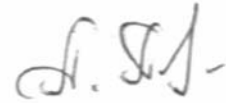


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ХАРЧУВАННЯ ТА ТОРГІВЛІ

ПАК АНДРІЙ ОЛЕГОВИЧ



УДК 621.365.5:664

**РОЗРОБКА НАУКОВИХ ОСНОВ ІНДУКОВАНОГО
ТЕПЛОМАСООБМІНУ ТА ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ В ПРОЦЕСАХ
ТА ОБЛАДНАННІ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ**

Спеціальність 05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних
та фармацевтичних виробництв

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському державному університеті харчування та торгівлі Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Погожих Микола Іванович,
Харківський державний університет харчування та торгівлі, завідувач кафедри фізико-математичних та інженерно-технічних дисциплін

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Богомолів Олексій Васильович,
Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка,
директор Навчально-наукового інституту переробних і харчових виробництв

доктор технічних наук, доцент
Скрипник Вячеслав Олександрович,
Вищий навчальний заклад Укоопспілки «Полтавський університет економіки і торгівлі»,
декан факультету харчових технологій, готельно-ресторанного та туристичного бізнесу, професор кафедри технологічного обладнання харчових виробництв і торгівлі

доктор технічних наук, професор
Станкевич Георгій Миколайович,
Одеська національна академія харчових технологій,
завідувач кафедри технології зберігання зерна

Захист відбудеться 7 грудня 2017 р. об 11 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.088.01 Харківського державного університету харчування та торгівлі за адресою: вул. Клочківська, 333, м. Харків, 61051.

Із дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського державного університету харчування та торгівлі за адресою: вул. Клочківська, 333, м. Харків, 61051.

Автореферат розісланий 6 листопада 2017 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



В.М. Онищенко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сучасному етапі розвитку галузей промисловості країн світу існує необхідність пошуку наукового обґрунтування рішень проблем ефективного використання енергетичних ресурсів за умови забезпечення вимог до екологічності виробництва. Особливий інтерес із цієї точки зору становлять процеси тепло- та масообміну (ТМО), які широко застосовуються в харчовій і переробній промисловості. Завдяки значному внеску в розвиток теорії ТМО таких класичних вчених, як О.В. Ликов, А.С. Гінзбург, М.О. Гришин, Г.К. Філоненко та сучасних вітчизняних і зарубіжних науковців, таких як А.А. Долинський, Ю.Ф. Снежкін, А.А. Халатов, Б.І. Басок, К.Д. Малецька, Ж.О. Петрова, Г.М. Станкевич, М.І. Погожих, В.О. Потапов, О.Г. Бурдо, А.М. Поперечний, В.М. Атаманюк, О.О. Завалій, В.В. Шутюк, С.П. Рудобашта, В.Ф. Сорочинський, О.І. Расев та ін., існує можливість знаходити нові шляхи в напрямі інтенсифікації цих процесів, зменшення питомих енерговитрат, удосконалення обладнання та підвищення якості кінцевої продукції. При цьому перспективним є пошук таких комбінацій потенціалів перенесення, за яких процеси перенесення не протікають самовільно, а лише за умови їх індукування. Для таких індукованих процесів один або декілька параметрів системи не мають «спорідненості» з навколишнім середовищем і прийняти рівноважне значення можуть тільки за умови подолання деякого енергетичного активаційного бар'єра. Апарати, створені на використанні таких процесів, як правило, характеризуються високою енергоефективністю та екологічністю. Таким чином, пошук і розробка теоретичних основ нових індукованих процесів та практична реалізація апаратів із їх використанням є досить пріоритетними напрямками всесвітньої політики та політики України у сфері енергоефективності.

Одним із таких індукованих процесів є процес, в основі якого лежить ефект індукованого тепломасообміну (ІнТМО). До сьогодні ефект ІнТМО отримав теоретичний розвиток лише в межах реалізації процесу сушіння харчової сировини (сушіння змішаним теплопідводом (ЗТП-сушіння)). Однак залишається недостатньо повно описаним фізичний механізм низки особливостей протікання ефекту ІнТМО, пояснити які, виходячи з теоретичних основ, наведених у роботах з його дослідження, неможливо. Розвинення теоретичних основ ефекту ІнТМО обумовлюють актуальність дослідження, яка полягає у виявленні потенціалу його використання в різних технологіях і техніці та в ефективному керуванні витратами енергії з отриманням продукції із заданими властивостями.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася відповідно до тематичних планів наукових досліджень кафедри фізико-математичних та інженерно-технічних дисциплін ХДУХТ у межах держбюджетної теми № 2-11 ФБ «Дослідження стану та структури вологи в харчових продуктах методами ЯМР та ЕПР-спектроскопії» (0108U001333), бюджетних тем № 06-11-13 Б «Наукові обґрунтування енергоефективних процесів харчової промисловості» (0110U006618) та № 13-14-16 Б «Удосконалення фізичних методів аналізу технологій та процесів харчових виробництв» (0113U008396), госпдоговірних тем № 31-14-15 Д «Аналіз енергоефективності механічних та теплових процесів під час переробки сільськогосподарської сировини»

(0114U005577) та № 10-16-17 Д «Розробка раціональних режимів гідротермічної обробки рослинної сировини способом з використанням індукованого тепломасообміну» (0116U008874).

Мета та завдання дослідження. Метою роботи є розробка наукових основ індукованого тепломасообміну та його використання в процесах та обладнанні харчових виробництв.

Виходячи із мети, сформульовані основні завдання дослідження:

- розробити гіпотезу ефекту ІнтМО, обґрунтувати необхідні та достатні вимоги для його спостереження;
- проаналізувати особливості ефекту ІнтМО методом фазового простору, довести розроблену гіпотезу експериментальними дослідженнями за різних керуючих параметрів та параметрів порядку;
- дослідити та проаналізувати вплив на характер протікання ІнтМО властивостей рідин переходити в газовий стан;
- установити особливості протікання ІнтМО за різної температури термостата;
- вивчити вплив способу та ступеня заповнення виділеного внутрішнього об'єму термостата на продуктивність видалення рідини з нього під час ІнтМО;
- дослідити вплив на інтенсивність ІнтМО параметрів потоку повітря, що рухається відносно обтюратора термостата;
- розробити та проаналізувати фізико-математичні моделі для керування процесом тепломасообміну під час ІнтМО шляхом варіювання керуючими параметрами та параметрами порядку;
- розробити концептуальні рішення технічної реалізації апаратів для харчової промисловості з використанням ІнтМО та вимоги до апаратного забезпечення практичного впровадження отриманих результатів на прикладі концептуального рішення; провести впровадження результатів дослідження у виробництво та навчальний процес;
- дослідити функціонально-технологічні властивості та показники якості харчової продукції, що отримується в апаратах із ІнтМО.

Об'єкт дослідження – процеси тепло- та масообміну під час виробництва харчових продуктів.

Предмет дослідження – харчова сировина рослинного та тваринного походження, кінетичні та динамічні характеристики ІнтМО, системна вода харчової сировини, фізико-математичні моделі процесів тепло- та масообміну під час ІнтМО, конструкції та вузли обладнання.

Методи дослідження – теоретичні методи дослідження нерівноважної термодинаміки та синергетики, методи дослідження стану та структури води, методи дослідження фізико-хімічних, функціонально-технологічних, структурно-механічних, мікробіологічних, органолептичних показників, методи системного аналізу, планування експерименту і математичної обробки експериментальних даних із використанням прикладних комп'ютерних програм.

Наукова новизна одержаних результатів. У роботі вперше:

- розкрито сутність ефекту ІнТМО, який спостерігається в термостаті з обтюратором та полягає в переході системи від нестійкої рівноваги до стійкої, який супроводжується розсіюванням теплоти за рахунок переходу рідкої фази всередині термостата в газовий стан та видалення її через обтюратор у довкілля;

- визначено основне рівняння ефекту ІнТМО, за яким потік маси рідини, що виноситься з термостата в газовому стані, індукує тепловий потік, який розсіюється всередині термостата, при цьому коефіцієнт пропорційності між потоками обумовлюється фізичними властивостями рідини, способом заповнення внутрішнього об'єму термостата і конструкцією обтюратора;

- доведено, що система «навколишнє середовище – внутрішнє середовище термостата» є проточною динамічною системою по відношенню до теплової енергії та маси, у якій відбуваються процеси самоорганізації, що обумовлює ефективне розсіювання теплової енергії за рахунок фазових переходів I роду;

- уведено поняття «системна вода» як рідка фаза, що знаходиться в об'ємі харчової системи всередині термостата впродовж часу, не меншого за характерний час технологічної операції, та яка визначає перебіг ТМО і функціонально-технологічні властивості цієї харчової системи;

- визначено необхідні та достатні умови для спостереження і регулювання ефекту ІнТМО; при цьому наявність суцільності газового середовища за парціальним тиском пари рідини всередині термостата є основним параметром порядку, без якого ефект ІнТМО неможливий;

- встановлено: робота потоку повітря, що рухається відносно обтюратора, є керуючим параметром системи «навколишнє середовище – внутрішнє середовище термостата», за допомогою якого організовується «запуск» ІнТМО; при цьому визначено, що основна функція потоку повітря – викликати флуктуації параметрів газового середовища в об'ємі обтюратора;

- визначена неможливість досягнення рідиною у внутрішньому об'ємі термостата температури кипіння за умови протікання ІнТМО за температур термостата, що перевищують критичні;

- обґрунтовано фізико-математичне моделювання ефекту ІнТМО як розв'язання теплової задачі; при цьому масообмін ураховано через функцію розвитку потужності дисипативних структур, яка описує розсіяння теплової енергії на фазовий перехід рідини в газовий стан;

- розроблено математичну модель розвитку потужності дисипативних структур під час ІнТМО, експериментально доведено коректність її використання для врахування особливостей ІнТМО під час інженерних розрахунків апаратів з його застосуванням.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено концептуальні рішення конструкцій нових універсальних апаратів з ІнТМО для виконання наступних технологічних операцій харчової промисловості: сушіння; гідротермічної обробки; випарювання, згущення сировини з високим вмістом системної води; ректифікації, перегонки, дистиляції розчинів, суспензій; охолодження, термостатування.

На основі концептуальних рішень апаратів з ІнТМО розроблено спосіб та апарат безперервної дії для гідротермічної обробки круп з ІнТМО, де кінцевою продукцією є швидковідновлювані каші. Із використанням емпіричних і стандартних рівнянь теплового й масового балансів з урахуванням особливостей ІнТМО розраховано основні характеристики розробленого апарата для гідротермічної обробки, якими доведено, що економічний ефект розробки досягається за рахунок скорочення кількості технологічних операцій, що використовуються, виконання основних операцій в одному апараті та за рахунок скорочення енерговитрат на одиницю продукції більш ніж у 1,3 разу порівняно зі способами, що існують. На технічне рішення, запропоноване в дисертаційній роботі, отримано 2 патенти України на корисну модель. Розроблено проект ТУ У 15.8-01566330-276:2012 «Каші швидковідновлювані».

Результати роботи впроваджено на ТОВ «Терра» (м. Первомайський, Харківська обл., акт від 13.02.2011 р.), ТОВ «Спільне українсько-німецьке підприємство «Злаки» (м. Полтава, акт від 13.09.2011 р.), ПСП ім. Т.Г. Шевченка (м. Богодухів, акти від 25.02.2015 р., 27.06.2017 р.) та в навчальний процес ХДУХТ (акти від 06.04.2012 р., 25.05.2015 р., 17.05.2017 р.).

Особистий внесок здобувача. Основні результати теоретичних і експериментальних досліджень отримані самостійно. Особистий внесок здобувача полягає у формулюванні наукової гіпотези, наукової концепції та доведенні наукових положень дисертації. Автор брав безпосередню участь у розробці методик, проведенні комплексних досліджень процесу й узагальненні експериментальних результатів, проведенні заходів з практичного упровадження результатів наукових досліджень, формулюванні висновків та підготовці до публікації результатів досліджень.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та були схвалені на: Всеукраїнській науково-практичній конференції «Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини» (м. Харків, 2008 р.); Міжнародній науково-практичній конференції, присвяченій 70-річчю з Дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ Беляєва М.І. «Стратегічні напрями розвитку підприємств харчових виробництв, ресторанного господарства і торгівлі» (м. Харків, 2008 р.); VII Міжнародній науково-технічній конференції «Техніка та технології харчових виробництв» (м. Могилів, 2009 р.); Міжнародному науково-технічному семінарі «Актуальні проблеми сушіння та термовологісної обробки матеріалів» (м. Вороніж, 2010 р.); VI Міжнародній конференції «Strategy of Quality in Industry and Education» (м. Варна, 2010 р.); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні енергозберігаючі технології (СЕТТ-2011)» (м. Москва, 2011 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини» (м. Харків, 2011 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі. Економічна стратегія і перспективи розвитку сфери торгівлі та послуг» (м. Харків, 2011–2013 рр.); Міжнародній науковій конференції «Наукова періодика

слов'янських країн в умовах глобалізації» (м. Київ, 2012 р.); Міжнародному науковому форумі «Харчові інновації та біотехнології» (м. Кемерово, 2013 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Вода в харчових продуктах і для харчових продуктів» (м. Харків, 2013 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність» (м. Харків, 2014–2016 рр.); Всеукраїнській науково-практичній конференції до 25-річчя факультету обладнання та технічного сервісу ХДУХТ «Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини» (м. Харків, 2015 р.); Міжнародній науково-практичній конференції, присвяченій 50-річчю заснування Харківського державного університету харчування та торгівлі «Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність» (м. Харків, 2017 р.), Всеукраїнській науково-практичній конференції, присвяченій 50-річчю заснування Харківського державного університету харчування та торгівлі «Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини» (м. Харків, 2017 р.).

Публікації. Матеріали дисертаційної роботи опубліковані в 55 наукових працях, серед яких: 3 монографії; 31 стаття, серед яких 27 – у наукових фахових виданнях України (з них 5 – у виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз), 1 – у науковому періодичному виданні іншої держави з напряду, із якого підготовлено дисертацію, та 3 статті у виданнях України, що включені до міжнародних наукометричних баз; 2 патенти України на корисну модель; 19 матеріалів конференцій, семінарів та тез доповідей.

Обсяг і структура дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел з 327 найменувань (у тому числі 61 іноземне) та 14 додатків. Основний зміст роботи викладено на 323 сторінках, вона містить 21 таблицю і 105 рисунків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі сформульовано актуальність обраної теми, обґрунтовано необхідність проведення комплексних фундаментальних досліджень із розвитку теоретичних основ ІнТМО. Сформульовано мету та завдання дослідження, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі «Аналіз сучасного стану теорії та техніки практичної реалізації процесів тепло- та масообміну харчової промисловості» обґрунтовано перспективність пошуку процесів, для яких початок та кінетика процесу в природних умовах не відповідає такому: виробництво ентропії наближається до нуля; потенційна (вільна) енергія прагне до мінімальної величини. Відзначено, для таких індукованих процесів спільним є те, що хоча б один або декілька параметрів або властивостей системи не мають «спорідненості» з навколишнім середовищем і прийняти рівноважну величину можуть тільки за подолання системою енергетичного активаційного бар'єра. Відмічено, що особливий інтерес з точки зору складності, енергоефективності та екологічності привертають до себе такі процеси як тепло- та масообмін, які входять майже до всіх технологій харчових виробництв.

Проведено аналіз літературних джерел практичної реалізації ТМО під час таких технологічних операцій як сушіння, випарювання, концентрування, дистиляція, термостатування. Встановлено, що в апаратній реалізації процесу ТМО здебільшого прагнуть до інтенсифікації природного процесу за рахунок створення певних умов, що в результаті лише збільшує виробництво ентропії й має обмеження.

Відзначено, що одним із індукованих процесів є ефект ІнТМО. Аналізом теоретичних основ ефекту ІнТМО, отриманих на сьогодні, визначено низку особливостей протікання ІнТМО, фізичний механізм яких залишається недостатньо розкритим. Установлено, що необхідність розвитку теоретичних основ ефекту ІнТМО та його моделювання полягає в тому, що розробка феноменологічних фізичних і фізико-математичних моделей для описання кінетичних та динамічних закономірностей, механізмів та рушійних сил ІнТМО надасть можливість виявити перспективи його використання в різних технологіях та техніці й ефективно керувати ним відповідно до обраної мети його застосування з отриманням заданих результатів або продукції із заданими властивостями.

У другому розділі «Гіпотеза ефекту індукованого тепломасообміну, методики дослідження та математична обробка експериментальних даних» сформульовано гіпотезу ефекту ІнТМО. Установлено, що ефект ІнТМО спостерігається в термостаті. Температура термостата T_m підтримується постійною, а його теплоємність вважається нескінченною. У виділеному об'ємі всередині термостата V_m знаходяться рідина об'ємом V_p і газ об'ємом V_g , який є сумішшю повітря і пари рідини. Також у V_m може міститися нерозчинна або частково розчинна в рідині суха речовина об'ємом $V_{c.p.}$, яка має або ні певну структуру. Тиск у термостаті p_m постійний і дорівнює атмосферному p_∞ . Із навколишнім середовищем термостат сполучається через обтюратор, що являє собою отвір у термостаті, із розміщеним у ньому капілярно-пористим тілом (КПТ), об'єм якого значно менший внутрішнього об'єму термостата $V_{обм} \ll V_m$. Площа поверхні обтюратора значно менша за площу поверхні термостата $S_{обм} \ll S_m$. Обтюратор обмежує вільний доступ газу навколишнього середовища до внутрішнього об'єму термостата. Він не містить або частково містить рідину і в загальному випадку характеризується коефіцієнтом фільтрації потоку газу k_ϕ , що задовольняє умові:

$$-k_\phi \nabla p \cong j_{диф}, \quad (1)$$

де $j_{диф}$ – дифузійний потік газу через обтюратор, кг/с; ∇p – градієнт тиску в обтюраторі, Па/м. При цьому для різниці тиску Δp в обтюраторі виконується умова:

$$\Delta p \ll p_\infty. \quad (2)$$

Для активації ефекту ІнТМО використовується механічна енергія потоку повітря, який рухається відносно зовнішньої поверхні обтюратора (E_A – енергія активації):

$$dE_A = d(p_n V) + \xi \cdot dE_k, \quad (3)$$

де ξ – безрозмірний коефіцієнт, що показує частину кінетичної енергії E_k , яка розсіюється в об'ємі обтюратора: $\xi < 1$; p_n – повний тиск потоку повітря, Па.

Таким чином, термостат з трьома фазами та обтюратором утворюють систему, яка має два рівноважні стани:

– нестійка рівновага – температура всіх частин динамічної системи асимптотично прагне до температури термостата; при цьому практично відсутній масообмін із навколишнім середовищем;

– стійка рівновага – температура всіх частин динамічної системи дорівнює температурі термостата; при цьому рідка фаза всередині термостата відсутня.

Сам ефект ІнтМО полягає в переході системи від нестійкої рівноваги до стійкої (рис. 1), який супроводжується розсіюванням теплоти за рахунок переходу рідкої фази в термостаті в газовий стан та її видалення через обтюратор.



Рис. 1. Рух системи від нестійкої до стійкої рівноваги під час ІнтМО

У першому, рівноважному стані (нестійка рівновага), фази всередині термостата знаходяться між собою в термічній рівновазі. Оскільки масообмін з навколишнім середовищем обмежений обтюратором, то через «затиснутість» умов, у яких знаходиться газове середовище у виділеному внутрішньому об'ємі термостата (внутрішнє газове середовище термостата), парціальний тиск пари рідини в ньому наближається до тиску насиченої пари рідини за даної температури. Газове середовище всередині термостата набуває властивостей суцільного за парціальним тиском пари рідини. Відхилення парціального тиску пари рідини від рівноважного значення примушує суцільне середовище протидіяти його зміні. Ефект ІнтМО спостерігається, якщо створювати флуктуації концентрації молекул пари рідини на границі розділу «навколишнє середовище – внутрішнє газове середовище термостата» і таким чином зменшити концентрацію молекул, а відповідно, і парціальний тиск пари рідини в суцільному газовому середовищі. На таку флуктуацію система відреагує відновленням парціального тиску пари рідини до рівня насиченої пари за рахунок переходу рідкої фази в газовий стан. Результатом є видалення рідкої фази з термостата, а саме – ефект ІнтМО. При цьому другий рівноважний стан (стійка рівновага) досягається тільки за умови, коли маса рідини в термостаті буде дорівнювати нулю: $m_p = 0$.

Необхідними і достатніми умовами для спостереження і регулювання ефекту ІнтМО є наступні.

1. Наявність флуктуацій параметрів газу в об'ємі обтюлятора.
2. Теплоємність термостата c_m має бути настільки великою, щоб виконувалася умова:

$$m_m c_m \Delta T_m \gg \Delta Q \text{ при } \Delta T_m \rightarrow 0, \quad (4)$$

де ΔQ – кількість теплоти (Дж), винесеної із термостата з газом рідини, яка випарувалася за тривалість спостереження $\Delta \tau$ (с); m_m – маса термостата, кг; ΔT_m – відхилення температури у внутрішньому виділеному об'ємі термостата від температури термостата, К.

3. Ефект спостерігається за кінцевий проміжок часу $\Delta \tau$:

$$\Delta \tau \ll \Delta \tau_{\text{диф}}, \quad (5)$$

де $\Delta \tau_{\text{диф}}$ – тривалість спостереження (с), упродовж якого термостат утратив масу рідини Δm_p (кг) за рахунок дифузійного потоку маси без флуктуацій параметрів газу в об'ємі обтюатора.

4. Флуктуації в об'ємі обтюатора можуть бути просторові і (або) за часом. При цьому стан внутрішнього газового середовища описується замкненими лініями за координатами p, V, T, v з центром k , тобто:

$$\delta \left(\frac{p}{nT} \right) \rightarrow k, \quad (6)$$

де k – стала Больцмана, Дж/К.

При цьому флуктуації δ у цьому випадку створюються зовнішнім відносно термостата середовищем, а релаксація відбувається за рахунок внутрішньої системи термостата і його теплоємності.

5. За флуктуації температури на границі розділу «обтюатор – навколишнє середовище» обтюатор повинен мати здатність виносу рідини в навколишнє середовище за рахунок, наприклад, капілярних сил.

6. Температура термостата може бути більшою за температуру кипіння рідини; при цьому температура рідини за ефекту ІнтМО знаходиться всередині граничного циклу:

$$T_{\text{крист}} < T_p < T_{\text{кип}}, \quad (7)$$

де $T_{\text{крист}}$ і $T_{\text{кип}}$ – температури кристалізації і кипіння рідини (К) за даного тиску p .

За законами збереження для ефекту ІнтМО справедлива рівність:

$$I_m^\infty = I_m^{\text{інд}} = I_m^{\text{вун}} \quad (8)$$

де I_m^∞ – потік маси, що уноситься в навколишнє середовище, кг/с; $I_m^{\text{інд}}$ – індукований потік маси, що проходить через обтюатор, кг/с; $I_m^{\text{вун}}$ – умовний потік маси з поверхні рідини в термостаті у внутрішнє газове середовище за рахунок її випаровування, кг/с. При цьому:

$$I_m^{\text{інд}} = j_m^{\text{інд}} \cdot S_{\text{обт}} = \frac{\mu}{N_A} \cdot \frac{\partial x_{\text{інд}}}{\partial \tau} \left(\langle n_{\text{інд}} \rangle + \frac{\partial \langle n_{\text{інд}} \rangle}{\partial x_{\text{інд}}} x_{\text{інд}} \right) S_{\text{обт}}, \quad (9)$$

$$I_m^{\text{вун}} = S_{\text{вун}} \cdot j_m^{\text{вун}} = S_{\text{вун}} \cdot f_{\text{вун}}(p, T) \frac{\mu}{N_A}, \quad (10)$$

де $j_m^{\text{інд}}$ – густина потоку маси через обтюатор, кг/(м²·с); $j_m^{\text{вун}}$ – густина потоку маси в газове середовище всередині термостата за рахунок переходу рідини в газовий стан, кг/(м²·с); $f_{\text{вун}}(p, T)$ – функція, яка визначає швидкість випаровування рідини з

одиниці площі поверхні, шт. молекул/(м²·с); $S_{обт}$ та $S_{вун}$ – площа зовнішньої поверхні обтюратора та площа випаровування всередині термостата, м²; μ – молярна маса рідини, кг/моль; N_A – число Авогадро, 1/моль; $\langle n_{інд} \rangle$ – середня концентрація частинок, які виносяться флуктуацією з об'ємом $V_{інд}$, шт. молекул/м³; $x_{інд}$ – координата, уздовж якої створюється флуктуація, м.

З отриманих виразів, видно, що флуктуації часова ($\partial x_{інд}/\partial \tau$) і просторова ($\partial \langle n_{інд} \rangle / \partial x_{інд}$) в об'ємі обтюратора індукують потік маси. Густина потоку маси у внутрішнє газове середовище термостата, що утворюється за рахунок переходу рідини в газовий стан ($j_m^{вун}$), помножена на питому теплоту її пароутворення (r), дорівнює густині теплового потоку, який витрачається на випаровування рідини всередині термостата ($j_q^{вун}$):

$$j_q^{вун} = r \cdot j_m^{вун}. \quad (11)$$

Ураховуючи (8–11), отримано рівняння ефекту ІнтМО:

$$j_m^{інд} = \frac{1}{r} \cdot \frac{S_{вун}}{S_{обт}} \cdot j_q^{вун}. \quad (12)$$

Таким чином, встановлено, що потік маси з термостата індукує потік теплоти до його внутрішнього середовища. Саме цей факт визначає ефективність розсіювання енергії під час ІнтМО.

З огляду на вищевикладене, наукова концепція роботи полягає у такому: теорія – індукування тепломасообміну в термостаті з обтюратором флуктуаціями параметрів газу в обтюраторі сприятиме ефективному випаровуванню рідини в термостаті; техніка – термостат з обтюратором, що містить рідину та (або) вологе колоїдне капілярно-пористе тіло (ККПТ), являє собою керований тепломасообмінний апарат для харчової промисловості.

У третьому розділі «Експериментальні та теоретичні дослідження ефекту індукованого тепломасообміну» аналізом процесу ТМО в термостаті методом фазового простору, який дозволяє описувати можливі шляхи розвитку динамічної системи за її фазовим портретом, що складається із фазових траєкторій, доведено принципові відмінності ІнтМО (ТМО з енергією активації) від ТМО без енергії активації в термостаті. Узагальненими координатами обрано: температуру внутрішнього середовища термостата T ; парціальний тиск пари рідини в ньому p ; безрозмірну координату $k_{\Psi} \Psi(T, w_{вун})$, яка є відношенням енергії, поглинутої внутрішнім середовищем термостата, до енергії, розсіяної даним середовищем:

$$k_{\Psi} \cdot \Psi(T, w_{вун}) = \frac{C_{сучт} \cdot dT}{r \cdot dw_{вун}}, \quad (13)$$

де k_{Ψ} – масштабний коефіцієнт, мм/мм; $C_{сучт}$ – питома теплоємність (на 1 кг сухих речовин тіла), Дж/(К·кг сух.реч); r – питома теплота пароутворення, Дж/кг; $w_{вун} = m_p / m_{с.р.}$ – питома кількість рідини, що перейшла у газовий стан (на 1 кг сухих речовин тіла), кг/кг сух. реч.

Величина $C_{суст} \cdot (dT/d\tau)$ пропорційна потужності теплової енергії, що надходить до внутрішнього середовища термостата від його стінок, а величина $r \cdot (dw_{sun}/d\tau)$ – потужності енергії, яка розсіюється в термостаті за рахунок фазового переходу рідини I роду.

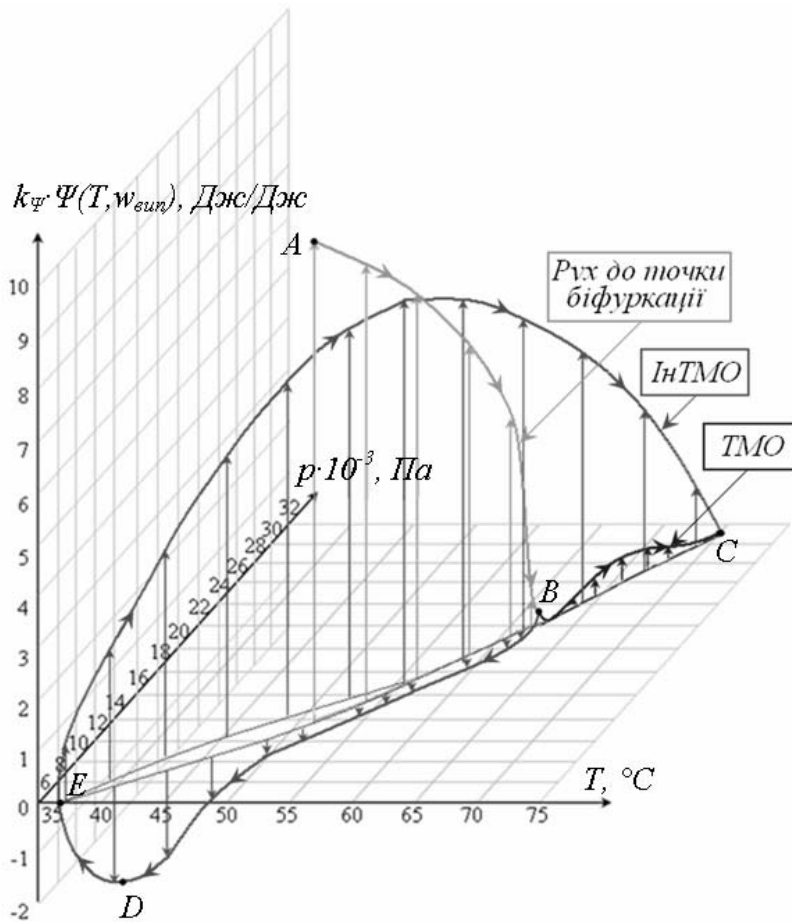


Рис. 2. Фазовий портрет процесу тепло-масообміну в термостаті: ТМО – тепло-масообмін без енергії активації; ІнТМО – тепло-масообмін з енергією активації

(крива BC) наявністю ділянки в негативній області фазового простору. Відзначено, що площу під негативною ділянкою фазової траєкторії на фазовій площині з координатами $\Psi(T, w_{sun})$ та T слід вважати критерієм енергоефективності ІнТМО, оскільки вона пропорційна частині тепловмісту внутрішнього середовища термостата, витраченому на фазовий перехід рідини в газовий стан.

Таким чином, доведено, що система «навколишнє середовище – внутрішнє середовище термостата» є проточною по відношенню до теплової енергії та маси системою, у якій спостерігаються процеси самоорганізації, що в сукупності зумовлює ефективне розсіювання теплової енергії за рахунок фазових переходів I роду. Для такої системи виділяють дві групи параметрів: параметри порядку – внутрішні властивості системи, які визначають масштаб ІнТМО та його кінетику; керуючі параметри – чинники, які дозволяють регулювати потужність ефекту зовнішніми діями.

На фазових траєкторіях розвитку системи за двома характерними шляхами еволюції (рис. 2) з енергією активації (ІнТМО) і без енергії активації (ТМО) виділені точки – нестійкої рівноваги B та стійкої рівноваги C . В точці B , яка є точкою біфуркації, будь-яка флуктуація, випадкова чи керована, виводить систему із стану нестійкої рівноваги і вона починає еволюціонувати до стійкої рівноваги (точки C) одним із наведених шляхів. Під час ефекту ІнТМО в точці біфуркації за одним із динамічних параметрів (для ІнТМО – це температура) система починає віддалятися від локальної рівноваги (крива BDE). У результаті фазова траєкторія ІнТМО (крива $BDEC$) відрізняється від ТМО без енергії активації

Установлено, що одним із параметрів порядку ефекту ІнтМО є здібність рідини всередині термостата переходити до газового стану, обумовлена взаємодією її з сухими речовинами. З огляду на це, для рідини всередині термостата введено поняття «системна рідина» або «системна вода». Це рідка частина, що знаходиться в об'ємі харчової системи всередині термостата протягом часу, не меншого за характерний час технологічної операції, та яка визначає перебіг ТМО і функціонально-технологічні властивості цієї харчової системи. Для будь-якої системи мольне відношення сухих речовин $v_{c.p.}$ з k «сухих» компонентів до кількості системної рідини $v_{c.в.}$ з n формами зв'язку має вигляд:

$$C_{\text{мол}} = \frac{v_{c.p.}}{v_{c.в.}} = \frac{\sum_{j=1}^k v_{c.p.}^j}{v_{c.в.} \sum_{i=1}^n a_i} = \frac{\sum_{j=1}^k \frac{v_{c.p.}^j}{v_{c.в.}}}{\sum_{i=1}^n a_i} = \frac{\sum_{j=1}^k g_j}{\sum_{i=1}^n a_i} \geq 0, v_{c.в.} > 0, \quad (14)$$

де a_i – мольна частка від загальної кількості системної рідини з i -ю формою зв'язку з сухими речовинами, моль/моль; g_j – відносна мольна частка j -ї компоненти сухої речовини в системній рідині, моль/моль.

Значення g_j визначаються, виходячи з хімічного складу зразка, а a_i – виходячи із експериментальних даних, отриманих різними термодинамічними та молекулярно-кінетичними методами дослідження форм зв'язку рідини з сухими речовинами. Загальна кількість системної води при цьому дорівнює:

$$v_{c.в.} = v_{c.в.} \left(\sum_{i=1}^l a_i + \sum_{i=l}^s a_i + \dots + \sum_{i=r}^n a_i \right) = v_{c.в.} (A_0 + A_1 + \dots + A_m) = v_{c.в.} \sum_{i=0}^m A_i, \quad (15)$$

де A_i – відносні частки води, кількість яких визначається методом та методикою дослідження.

Ґрунтовність такого аналізу полягає в тому, що значення мольних часток компонентів сухої речовини в системній рідині обумовлюють закономірності змін стану та структури рідини в харчовій сировині під час технологічної обробки з ТМО. При цьому прагнення до рівноваги між агрегатними станами рідини є основним кінетичним та енергетичним чинником ефективності обраної технології.

У рівнянні ефекту ІнтМО (10) властивість рідини переходити до газового стану враховується функцією $f_{\text{вун}}(p, T)$, яка обумовлює величину потоку маси до суцільного газового середовища всередині термостата. Функція $f_{\text{вун}}(p, T)$ визначається тиском і температурою в термостаті та залежить від форми зв'язку рідини з сухими речовинами та її структури. Умовно її можна представити як суму:

$$f_{\text{вун}}(p, T) = A_0 \cdot f_{\text{вун}}^0(p, T) + A_1 \cdot f_{\text{вун}}^1(p, T) + \dots + A_m \cdot f_{\text{вун}}^m(p, T), \quad (16)$$

де $f_{\text{вун}}^i(p, T)$ – визначається лише тиском та температурою для рідини з відповідною формою зв'язку з сухими речовинами; A_0 – відносна частка системної рідини, яка має властивості об'ємної (вільної) рідини.

Якщо в термостаті знаходиться тільки рідина, то $A_0=1$. Частина системної рідини A_0 бере участь у масообміні під час ІнтМО, тому аналіз функції $f_{\text{вун}}(p, T)$ може бути обмежений першим доданком.

Оскільки предметом дослідження є харчова сировина, то досліджувалася системна вода сировини, для якої ТМО є частиною технологічної обробки. Низькотемпературним калориметричним методом визначена відносна частка вимороженої системної води, яка визначає швидкість випаровування води з одиниці площі поверхні за визначених тиску і температури під час ІТМО для різних харчових систем, що являють собою колоїдні тіла (КТ) (табл. 1).

В дослідженні відносних часток системної води A_i – дві. Індекс «0» відповідає частині, для якої відбувся фазовий перехід I роду за температури $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Відповідно відносна частка невимороженої системної води (індекс «1») дорівнює $A_1=1-A_0$. Установлено, що внесення таких добавок, як пектин, цукор, еламін, крохмаль, концентрати тваринних білків (Сканпро 91, 95), напівфабрикат кістковий харчовий (НКХ) у плодово-ягідну сировину та сировину тваринного походження приводить до зменшення на 10...20% кількості системної води, яка бере участь у ІТМО. Відзначено, що частина системної води, яка не випаровується за температури менше ніж $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, не замерзає за температури $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, не витікає тощо, визначає вимоги до умов зберігання харчової сировини та продуктів.

Таблиця 1

Відносна частка вимороженої за температури мінус $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ системної води

Зразок	A_0 свіжоприготованих зразків, кг/кг	A_0 зразків після зберігання, кг/кг
КТ із плодово-ягідної сировини з додаванням		
5% цукру, 0,5% пектину	0,43	0,55
7% цукру, 0,7% пектину	0,38	0,44
10% цукру, 2,0% пектину	0,35	0,39
КТ із молоковмісної сировини з додаванням		
0,8% пектину	0,82	0,65
0,8% пектину, 1,0% крохмалю	0,82	0,74
0,8% пектину, 3,0% крохмалю	0,83	0,77
1,1% пектину, 1,0% крохмалю	0,87	0,83
КТ із сировини тваринного походження		
М'ясний паштет (контроль)	0,49	0,36
М'ясний паштет з НКХ та еламіном	0,54	0,42
Печінковий паштет (контроль)	0,47	0,34
Печінковий паштет з НКХ та еламіном	0,52	0,46
КТ із агарових драглів з додаванням		
Агарові драгли (контроль)	0,78	–
20% цукру	0,93	–
40% цукру	0,95	–
0,4% Сканпро Т95	0,90	–
0,4% Сканпро Т95 та 20% цукру	0,95	–
0,6% Сканпро Т95 та 20% цукру	0,97	–
0,4% Сканпро Т91	0,89	–

Для дослідження динамічної поведінки системної води харчових систем під час ІТМО розроблено нову методику аналізу ЕПР-спектрів. Методика полягає у

визначенні частини системної води, яка є розчинником іонної солі та бере участь у ІНТМО. Перевагами розробленої методики є можливість ідентифікації системної води сировини з низьким вологовмістом та дослідження її динамічної поведінки під час масообміну.

За цією методикою спектральна лінія спінміченого зразка (рис. 3 а), яка являє собою інтенсивність ЕПР-сигналу I за різної магнітної індукції H , розглядається як сума спектра з однієї широкої лінії (рис. 3 б) та спектра з 6 піків однакової ширини (рис. 3 в). Площа під 6-піковим спектром (S_{6p}) пропорційна кількості системної води, яка розчиняє іонну сіль, а площа під 1-піковим (S_{1p}) – кількості системної води, що не розчиняє цю сіль. Розраховуючи площі під відповідними спектрами в процесі зневоднення вологих зразків, можна дослідити процес видалення розчинника із найближчого оточення мітки.

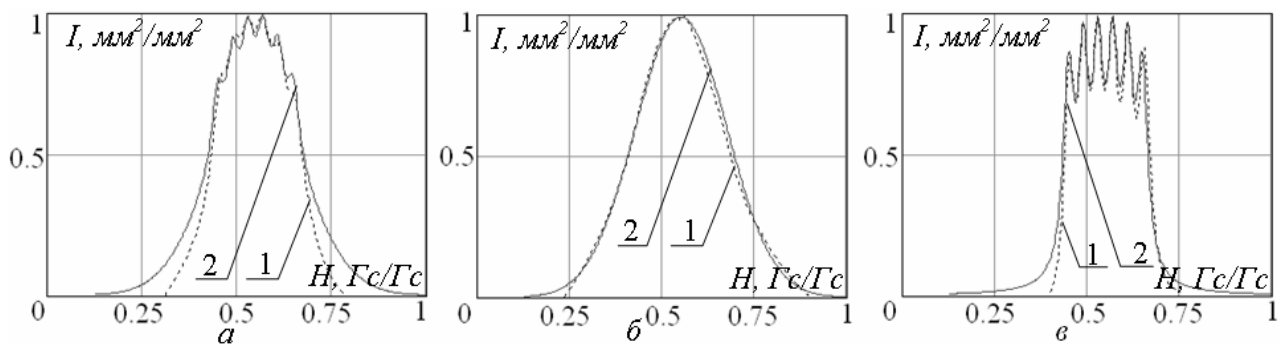


Рис. 3. Експериментальні ЕПР-спектри (1) та апроксимаційні функції (2) для: а – харчової системи; б – порошку солі $MnSO_4$; в – 5%-розчину солі $MnSO_4$

Дослідженнями динамічної поведінки системної води модельних ККПТ із крохмалю та КТ із клейковини пшениці встановлено, що зміни площі під 6-піковим та 1-піковим сигналами в процесі зневоднення для різних зразків мають однаковий характер (рис. 4).

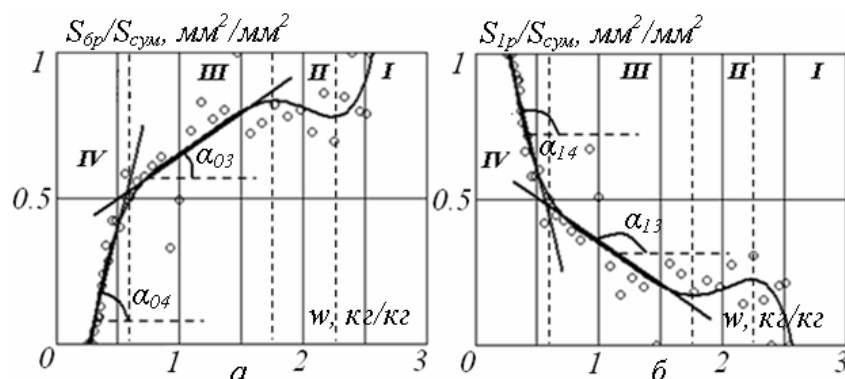


Рис. 4. Відносні площі (пронормовані на сумарну площу ($S_{сум}$) під ЕПР-спектром) під 6-піковим (S_{6p}) (а) та під 1-піковим (S_{1p}) (б) ЕПР-спектрами модельного тіла за різного його вологовмісту w

Установлено, що на залежностях площі під спектрами наявні дві лінійні ділянки (III та IV), що свідчить про дві форми зв'язку системної води з сухими речовинами. Різкий перехід між ділянками відповідає утворенню поверхні розділу

під час переходу до видалення системної води з іншою формою зв'язку. Кількість молів системної води на цих ділянках (III та IV) визначається за формулами:

$$v_{c.в.3}(\tau) = v_{c.в.3}(\tau) \cdot A_{03}(v_{c.в.3}) + v_{c.в.3}(\tau) \cdot A_{13}(v_{c.в.3}), \quad (17)$$

$$v_{c.в.4}(\tau) = v_{c.в.4}(\tau) \cdot A_{04}(v_{c.в.4}) + v_{c.в.4}(\tau) \cdot A_{14}(v_{c.в.3}), \quad (18)$$

де коефіцієнти A є тангенсами кута нахилу апроксимаційних прямих на відповідних ділянках кривих (індекс «0» – частина системної води, яка є розчинником, індексом «1» – частина води, яка не розчиняє сіль); τ – поточна тривалість зневоднення, с.

При цьому зміна тангенсів кута нахилу (рис. 5) від молярної маси крохмалю та від його мольної концентрації доводить наявність, як мінімум, трьох структур системної води.

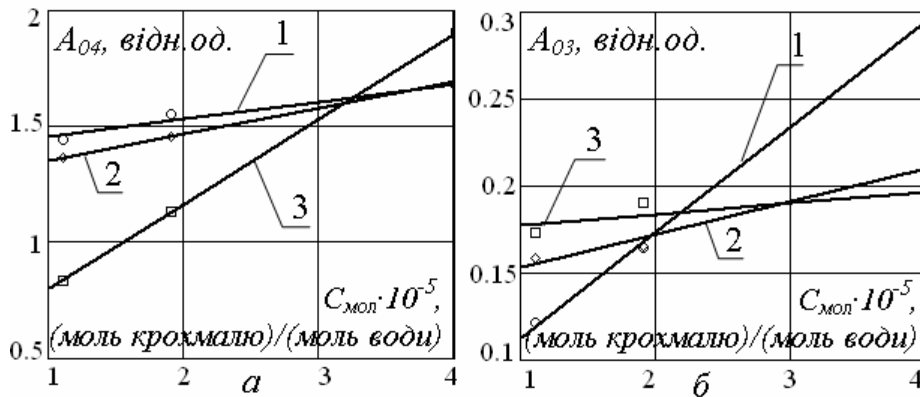


Рис. 5. Тангенси кута нахилу на четвертій (а) та третій (б) ділянках кривих за різної мольної концентрації зразка для крохмалів із середньою молярною масою, г/моль: 1 – $6 \cdot 10^6$; 2 – $2 \cdot 10^6$; 3 – $1 \cdot 10^6$

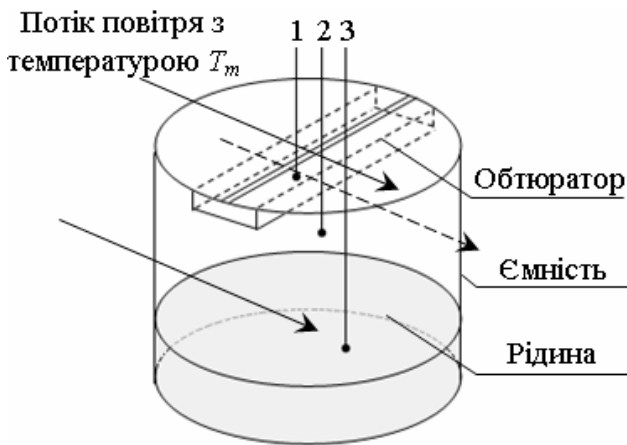


Рис. 6. Схема експериментальної установки для моделювання випарювання, концентрування та згущення з використанням ІнтМО: 1, 2, 3 – термопари

Таким чином, проведеними термодинамічними та молекулярно-кінетичними дослідженнями визначена частина системної води, яка визначає внутрішній масообмін усередині термостата та зумовлює необоротні процеси в харчовій сировині та продуктах.

Досліджено ІнтМО в прототипі апарата для випарювання, концентрування та згущення, який є найпростішим варіантом організації цього ефекту та являє термостат з обтюратором, що утримує рідину ($A_0=1$) та газ (рис. 6). Як рідина використовувалися вода, етиловий спирт, їх суміш. Внутрішня частина термостата – прозора скляна

циліндрична ємність, у верхній частині якої встановлено обтюратор. Функцію створення флуктуації газового середовища в об'ємі обтюлятора та функцію термостатування забезпечували потоком повітря з визначеною температурою, що омиває зовнішню поверхню циліндричної ємності. При цьому температура термостата підтримувалася більшою за температуру кипіння рідини в ньому.

Візуальним спостереженням та за кінетиками температури складових внутрішнього середовища термостата (лінії 3 та 6 з рис. 7 а) під час ІнтМО, де як рідка фаза по чергово використовувалися етиловий спирт та вода, встановлено, що кипіння за температури термостата із діапазону від 100 до 140 °С ні для спирту, ні для води, ні для їх суміші не відбувалось. Отриманим результатом встановлена неможливість досягнення рідиною у внутрішньому середовищі термостата температури кипіння за умови протікання ІнтМО.

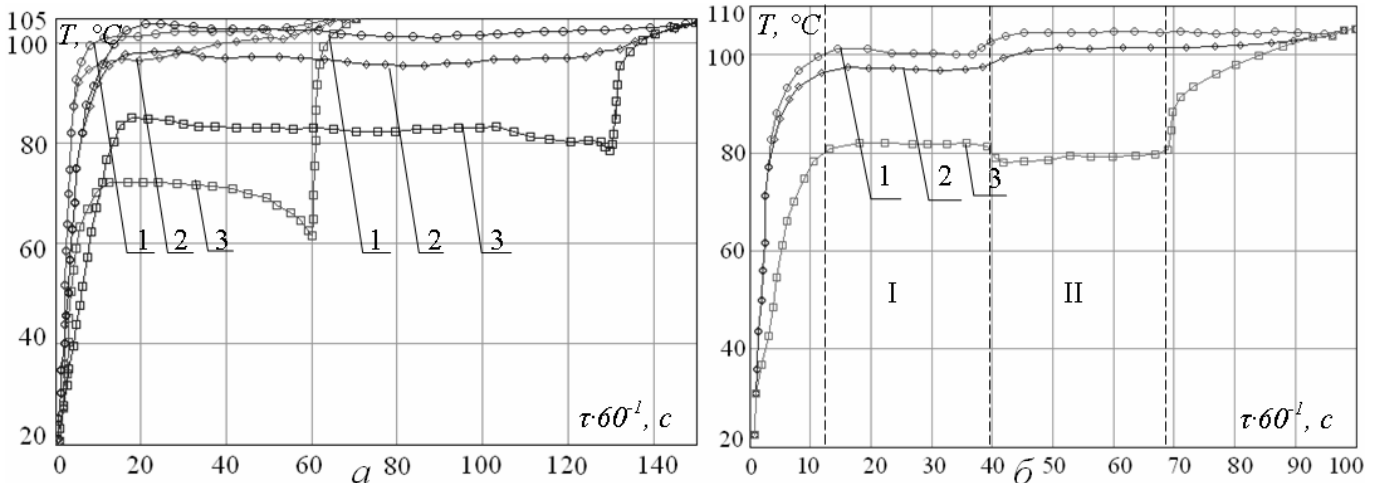


Рис. 7. Кінетика температури складових внутрішнього середовища термостата під час моделювання випарювання, концентрування та згущення з ІнтМО: а – етиловий спирт та вода; б – суміш спирту та води (цифрами позначені термопари з рис. 6)

Установлено, що для суміші етилового спирту та води всередині термостата на кінетиці температури (лінія 3 з рис. 7 б) наявний стрибкоподібний перехід, який відповідає закінченню випаровування спирту в термостаті та початку переходу рідкої води в газовий стан. Важливим результатом є встановлення факту, що етиловий спирт та вода переходять до газового стану під час ІнтМО окремо (ділянка I – спирт, ділянка II – вода). При цьому фіксувати видалення рідкої фази компонентів суміші можна за кінетикою температури. Відзначено, що з точки зору практичного застосування ІнтМО в харчовій промисловості ця особливість може бути використана для таких операцій як ректифікація, перегонка, дистиляція без фази кипіння. Відмічено, що перетин кінетик температури складових внутрішнього середовища термостата є відбиттям їх теплофізичних властивостей, що може бути використано для їх дослідження, а термостат з ІнтМО – як лабораторне обладнання.

Моделюванням ІнтМО за наявності твердої, рідкої та газової фаз усередині термостата з розривами між фазами встановлений основний параметр порядку ефекта ІнтМО – наявність суцільності газового середовища всередині термостата за парціальним тиском пари рідини. У разі забезпечення цього параметра порядку ефекта ІнтМО можливий навіть за умови просторового відділення сухих речовин і рідини. Моделювання проводилося в термостаті, внутрішній об'єм якого складався з двох камер (рис. 8), відділених одна від одної перфорованою перегородкою. Верхня камера щільно заповнювалася ККПТ, а нижня – водою. Єдиним шляхом для

масообміну між навколишнім та внутрішнім середовищами термостата є обтюратори, наявні лише у верхній камері.

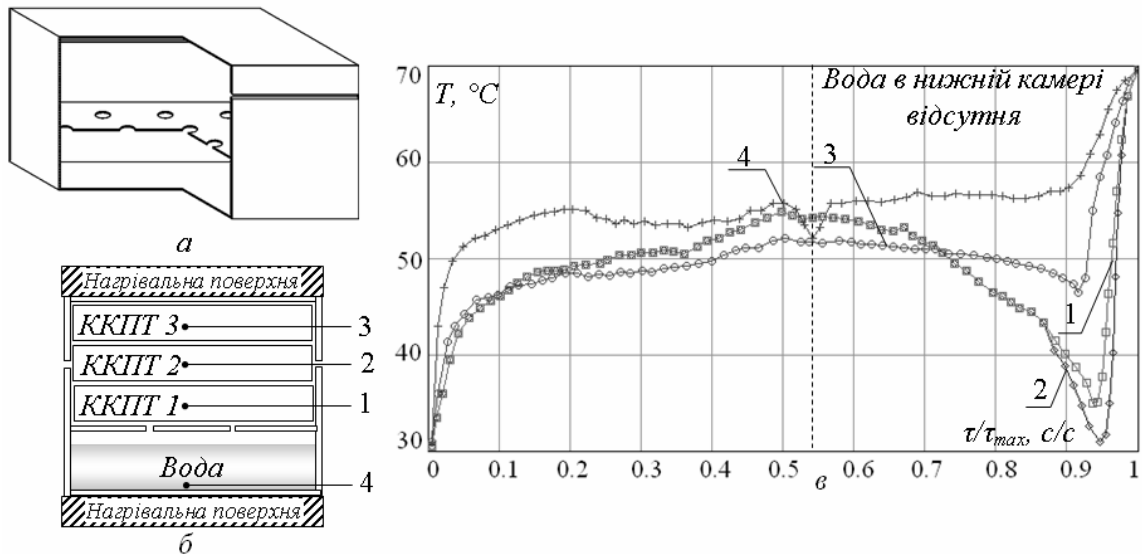


Рис. 8. Моделювання ІнтМО в сировині, що являє просторово відокремлені ККПТ та рідину: *a* – загальний вигляд термостата; *б* – схема розміщення термопар (1, 2, 3, 4); *в* – кінетики температур від термопар, пронормовані на загальну тривалість процесу τ_{max}

Кінетики температур, отримані за такої організації ТМО, мають характерний для ІнтМО вигляд (рис. 8 *в*) з особливістю – наявністю мітки на кінетиці температури рідини. Такий локальний мінімум свідчить про повне видалення рідкої фази з нижньої ємності, що має практичну цінність для здійснення операцій із просторовим відділенням сухих речовин і рідини, таких як ароматизація або одночасна гідротермічна обробка з сушінням, причому за організації ІнтМО в одному універсальному апараті.

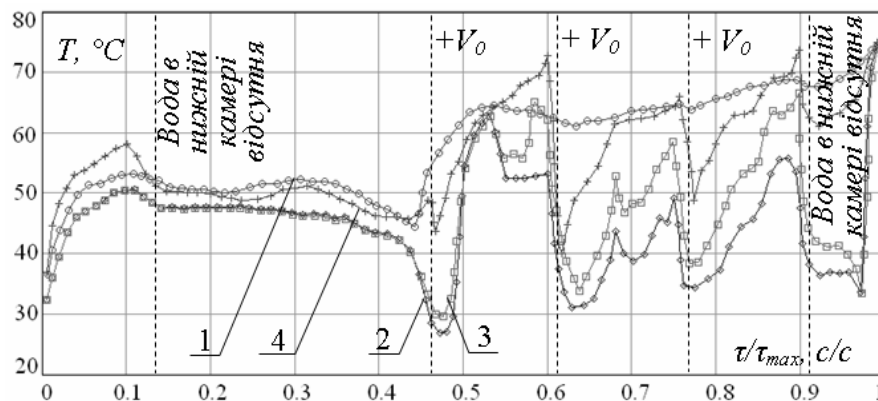


Рис. 9. Кінетики температури, отримані від різних термопар (1, 2, 3, 4 – термопари з рис. 8) під час ІнтМО в термостаті з періодичним додаванням води об'ємом V_0

Для організації безперервно діючих процесів досліджувався ефект ІнтМО в тому ж термостаті з періодичним додаванням води в нижню камеру по мірі її випаровування. Із кінетики температури (рис. 9) складових внутрішнього об'єму термостата, пронормованої на загальну тривалість процесу τ_{max} , видно: тривалість

випаровування доданої води постійна. Отримане свідчить про те, що продуктивність термостата за випаруваною водою визначається продуктивністю обтюратора. При цьому продуктивність обтюратора, яка розраховується за формулою

$$Pr_{обт} = \frac{\Delta m_p}{S_{обт} \cdot \Delta \tau}, \quad (19)$$

є одним із чинників, за допомогою якого можливе керування ІнТМО на практиці. Розрахунки показують: питома продуктивність робочої поверхні термостата в 1,7 разу більша порівняно з продуктивністю випаровування з відкритої поверхні води за тих же температури (75 °С) та швидкості руху ($v=10$ м/с) над поверхнею, що вигідно вирізняє ІнТМО.

Моделювання сушіння та гідротермічної обробки з ІнТМО сировини з високою поруватістю або високим ступенем усадки (об'єм пустот – 30...50% об'єму термостата) проводилося шляхом створення між шарами ККПТ розривів сумірних із внутрішнім об'ємом термостата (рис. 10 а). Характер ІнТМО за наявності таких розривів не відрізняється від характеру ІнТМО за їх відсутності (рис. 10 в).

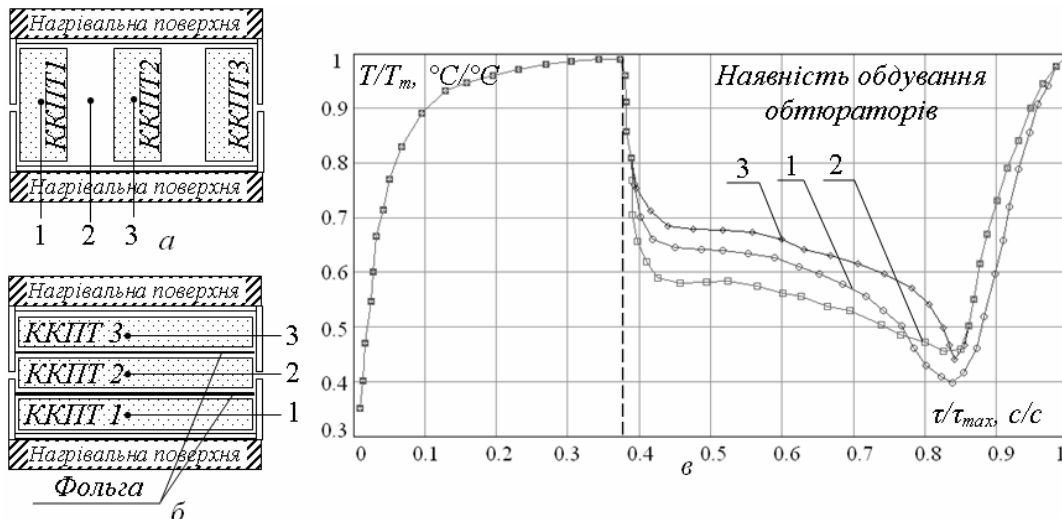


Рис. 10. Схема розміщення ККПТ під час моделювання обробки з ІнТМО сировини з високою поруватістю або високим ступенем усадки (а) і сировини з газонепроникними включеннями за їх горизонтальної орієнтації (б) та кінетики температури (пронормовані на загальну тривалість процесу τ_{max} та температуру термостата T_m) (в), отримані від термопар 1, 2, 3

Такий же результат отриманий і під час моделювання обробки з ІнТМО сировини з частинками, що мають газонепроникні включення. Ці включення організовувалися шляхом створення між шарами ККПТ (рис. 10 б, 11 а) границь розділу з газонепроникного матеріалу (листки алюмінієвої фольги). Моделюванням ІнТМО за горизонтальної орієнтації сировини з газонепроникними включеннями встановлено, що різні шари ККПТ досягли рівноважного вологовмісту з різницею тривалості в 10% загальної тривалості процесу ТМО. Отримане підтверджує феноменологічну гіпотезу ефекту ІнТМО та доводить, що границя розділу «навколишнє середовище – внутрішнє середовище термостата» знаходиться в об'ємі обтюратора, а газове середовище всередині термостата є суцільним.

Моделюванням вертикальної орієнтації сировини з газонепроникними включеннями (рис. 11 а) встановлено, що фазові портрети ефекту ІнтМО за такої організації структури внутрішнього середовища термостата мають дві петлі з частиною фазової траєкторії в негативній області (рис. 12).

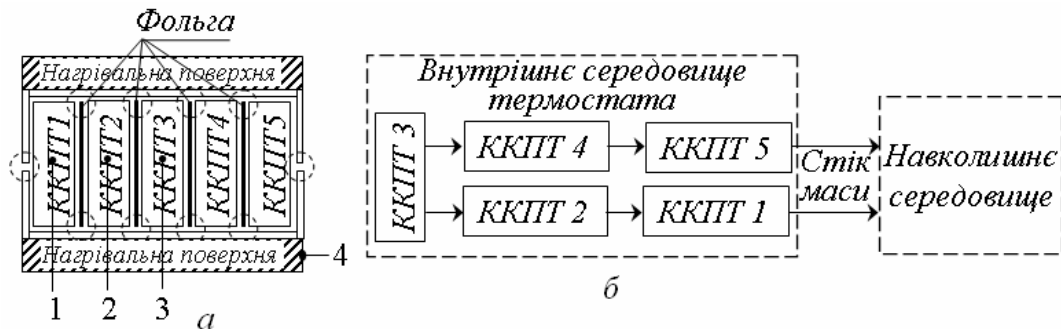


Рис. 11. Моделювання ІнтМО за вертикальної орієнтації сировини з газонепроникними включеннями: а – схема розміщення ККПТ та термопар (1, 2, 3, 4); б – еквівалентна схема термостата

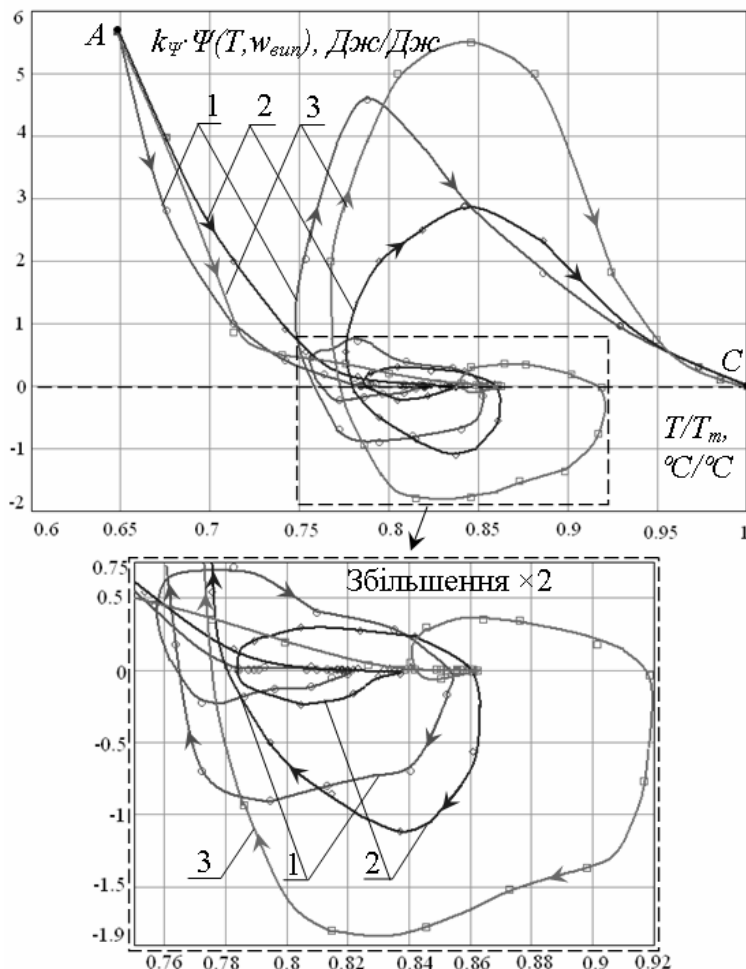


Рис. 12. Фазові портрети ІнтМО за вертикальної орієнтації сировини з газонепроникними включеннями: 1, 2, 3 – термопарі з рис. 11

Відзначено, що перша петля має місце через протікання ІнтМО в шарах, обтюратори яких знаходяться на границі розділу з навколишнім середовищем. Друга петля має місце через перебіг ІнтМО у внутрішніх шарах. Установлено, що за таких умов організації ТМО має місце розщеплення фазового портрета. Для такої організації структури внутрішнього середовища термостата має місце розділення системи на підсистеми. При цьому термостат являє послідовно та паралельно поєднані між собою умовні термостати, умовна еквівалентна схема яких наведена на рис. 11 б.

Отриманий результат довів: під час ІнтМО має місце спрямованість характеру протікання процесу ТМО, тобто особливості перетікання ІнтМО в будь-якому виділеному об'ємі внутрішнього середовища термостата відбиваються на характері його перетікання для інших виділених об'ємів. Наявність спрямованості процесу ТМО є ознакою

інших виділених об'ємів. Наявність спрямованості процесу ТМО є ознакою

керованості ІНТМО та його універсальності по сировині, тобто існує можливість обробки різної сировини в одному апараті без її змішування.

Відзначено, що важливою енергетичною характеристикою для процесів та апаратів є баланс теплоти.

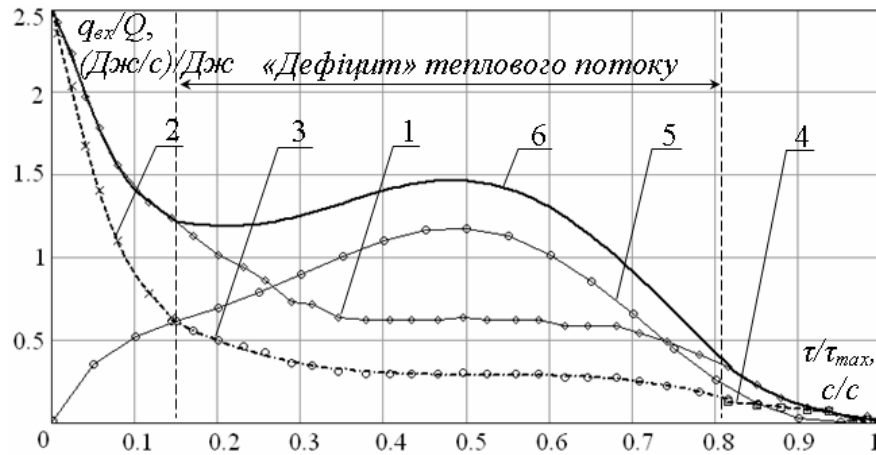


Рис. 13. Кінетика теплового потоку від стінок термостата до його внутрішнього середовища (1) та кінетика теплового потоку, що витрачається внутрішнім середовищем термостата (6), отримана на основі розрахунків за складовими (2–5), пронормовані на загальну кількість теплоти Q

Тепловий потік, який надходить до внутрішнього середовища термостата (q_{ex}), витрачається на фазовий перехід води ($q_{вин}$) та нагрівання ККПТ ($q_{c.p.}$) і системної води ($q_{c.в.}$) до температури термостата (рис. 13):

$$q_{ex} = q_{вин} + q_{c.p.} + q_{c.в.} \quad (20)$$

При цьому частина теплового потоку, що витрачається на фазовий перехід системної води (потік, що розсіюється), розраховується за формулою:

$$q_{вин} = -\frac{dm_g}{d\tau} \cdot r, \quad (21)$$

частина теплового потоку, що витрачається на нагрівання ККПТ до поточної температури:

$$q_{c.p.} = C_{c.p.} \cdot m_{c.p.} \cdot \frac{dT}{d\tau}, \quad (22)$$

частина теплового потоку, що витрачається на нагрівання поточної маси системної води ($m_{c.в.}$) всередині термостата до поточної температури:

$$q_{c.в.} = C_{c.в.} \cdot m_{c.в.} \cdot \frac{dT}{d\tau}, \quad (23)$$

де $C_{c.p.}$, $C_{c.в.}$ – теплоємність сухих речовин та системної води, Дж/(кг·К); $m_{c.p.}$ – маса сухих речовин, кг; $m_{c.в.}$ – поточна маса системної води в термостаті, кг.

Виходячи з кінетики теплового потоку від стінок термостата до його внутрішнього середовища (1), кінетики теплового потоку, що витрачається на нагрівання сухих речовин та поточної кількості води у внутрішньому середовищі термостата (2, 3, 4 – відповідно до етапів процесу) і кінетики теплового потоку, який витрачається на випаровування води у внутрішньому середовищі термостата

(рис. 13), пронормованих на загальну кількість теплоти Q та на загальну тривалість процесу τ_{max} , установлено, що під час ІнтМО наявний дефіцит теплоти, який становить 25...30% від необхідної кількості.

Відзначено, що спостережуваний факт свідчить про виконання роботи над системою, яка індукується потоком повітря, який рухається відносно обтюратора термостата. Зовнішня робота потоку повітря, який рухається відносно обтюратора, забезпечує за величиною енергію активації E_A ефекту ІнтМО. За значень цього керуючого параметра менших E_A «запуск» ефекту ІнтМО не відбувається. Таким чином, доведено: робота потоку повітря, що рухається відносно обтюратора, є тим

керуючим параметром, за допомогою якого організовується «запуск» ІнтМО.

Важливо відзначити, що енергія активації забезпечується не стільки кінетичною енергією молекул повітря, скільки кінетичною енергією його потоку, яка не залежить від його температури та масової витрати. Відмічене доведено тим, що характер ІнтМО та його тривалість під час обдування обтюраторів підігрітим повітрям та повітрям з лабораторною (15...20 °С) температурою – однаковий. Такий же результат отримано і для різної витрати повітря, що рухається відносно обтюраторів: фазові траєкторії ІнтМО (криві AB_1E_1C та AB_2E_2C) відрізняються одна від одної в межах похибки при тому, що витрати повітря відрізняються на два порядки (рис. 14). Таким чином, температура і витрати повітря не чинять істотного впливу на характер ІнтМО і не є баластом енергії.

Відзначено, що однією з основних властивостей потоку повітря є його швидкість. Дослідженнями кінетики потоку теплоти, що витрачається всередині термостата, за різної

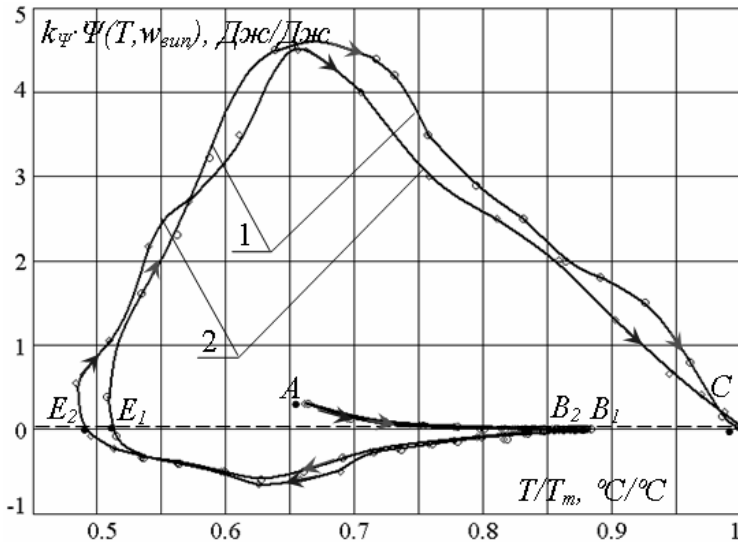


Рис. 14. Фазові портрети ІнтМО за обдування обтюраторів повітрям зі швидкістю 4 м/с з витратами, м³/с: 1 – $8 \cdot 10^{-4}$; 2 – $8 \cdot 10^{-2}$

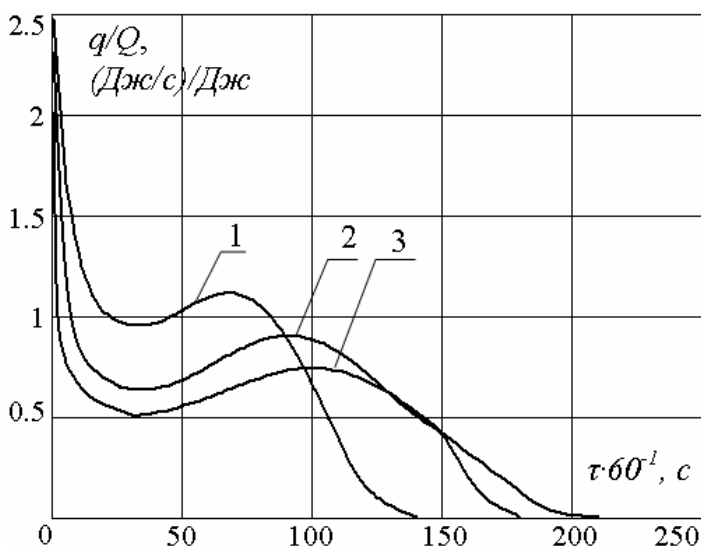


Рис. 15. Кінетика теплового потоку, що витрачається у внутрішньому середовищі термостата, за різної швидкості руху повітря відносно обтюраторів, м/с: 1 – 13; 2 – 9; 3 – 4

швидкості потоку повітря встановлено, що вони відрізняються амплітудою і шириною локальних максимумів (рис. 15), тобто інтенсивністю протікання ІнтМО. Установлено, що інтенсивність ІнтМО може регулюватися в межах 15...20% швидкістю потоку повітря (від 4 до 13 м/с), що рухається відносно обтюраторів.

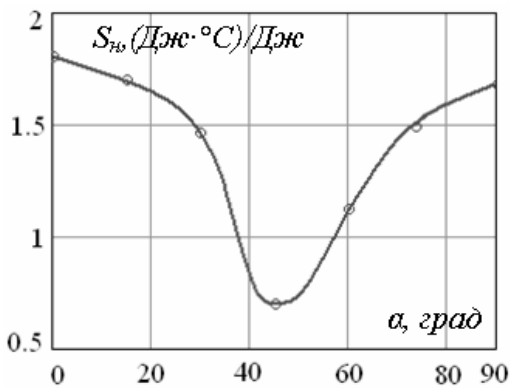


Рис. 16. Площа під негативною ділянкою фазової траєкторії від кута обдування обтюраторів

Відзначено, дисипація кінетичної енергії потоку повітря залежить від кута обдування обтюратора. Установлено, що залежність площі під негативними частинами фазових траєкторій ефекту ІнтМО (S_n) за різних кутів обдування обтюраторів має локальний мінімум (рис. 16). Для кутів обдування від 35° до 55° значення площі, а відповідно і енергоефективність ІнтМО, менша у 2 рази порівняно з кутами 0° та 90° , за яких досягається найбільша енергоефективність.

Таким чином, дослідження, проведені в розділі, підтвердили гіпотезу ефекту ІнтМО та виявили можливості його використання для

виконання низки теплових операцій харчової промисловості.

У четвертому розділі «Фізико-математичне моделювання ефекту індукованого тепломасообміну» теоретичними дослідженнями виявлені особливості механізму та рушійних сил ІнтМО. Отримано наближений розв'язок задачі про розподіл температури та вологовмісту в термостатах циліндричної та паралелепіпедної форми, щільно заповнених ККПТ, за межових умов третього та першого роду методом R-функцій сумісно з методом малого параметра та сумісно з проєкційним методом Бубнова–Гальоркіна. За розподіленнями полів температур, побудованих з використанням отриманих математичних моделей, установлено, що температура всередині термостата як циліндричної (рис. 17 а), так і паралелепіпедної форми (рис. 17 б), не зменшується, що свідчить про відсутність «запуску» ІнтМО. Відзначено, що застосування розроблених моделей, які базуються на класичних диференціальних рівняннях ТМО, навіть із застосуванням R-функцій, не відтворює ефект ІнтМО.

Обґрунтовано фізико-математичне моделювання ІнтМО як вирішення теплової задачі, а не тепломасообмінної. Рівняння теплопровідності при цьому для термостата, заповненого ККПТ, де масообмін урахується через функцію f_d , яка описує розсіювання теплової енергії на фазовий перехід води в газовий стан, має вигляд:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \Delta T + \frac{1}{c\rho} f_i + \frac{1}{c\rho} f_d, \quad (24)$$

де T – температура ККПТ, $^\circ\text{C}$; τ – час, с; λ , c і ρ – коефіцієнт теплопровідності, теплоємність і густина ККПТ; f_i – функція розподілення потужності внутрішніх джерел теплоти всередині термостата, Дж/(м³·с); f_d – функція розвитку потужності дисипативних структур, Дж/(м³·с).

Вирішенням рівняння (24) відносно шуканої функції розвитку потужності дисипативних структур f_d усередині термостата під час ІнтМО знайдено її аналітичний вигляд. Порівнянням експериментальних результатів та результатів математичного моделювання доведено коректність уведення функції f_d для описання ІнтМО та інженерних розрахунків апаратів із варіюванням параметрів порядку та керуючих параметрів ІнтМО.

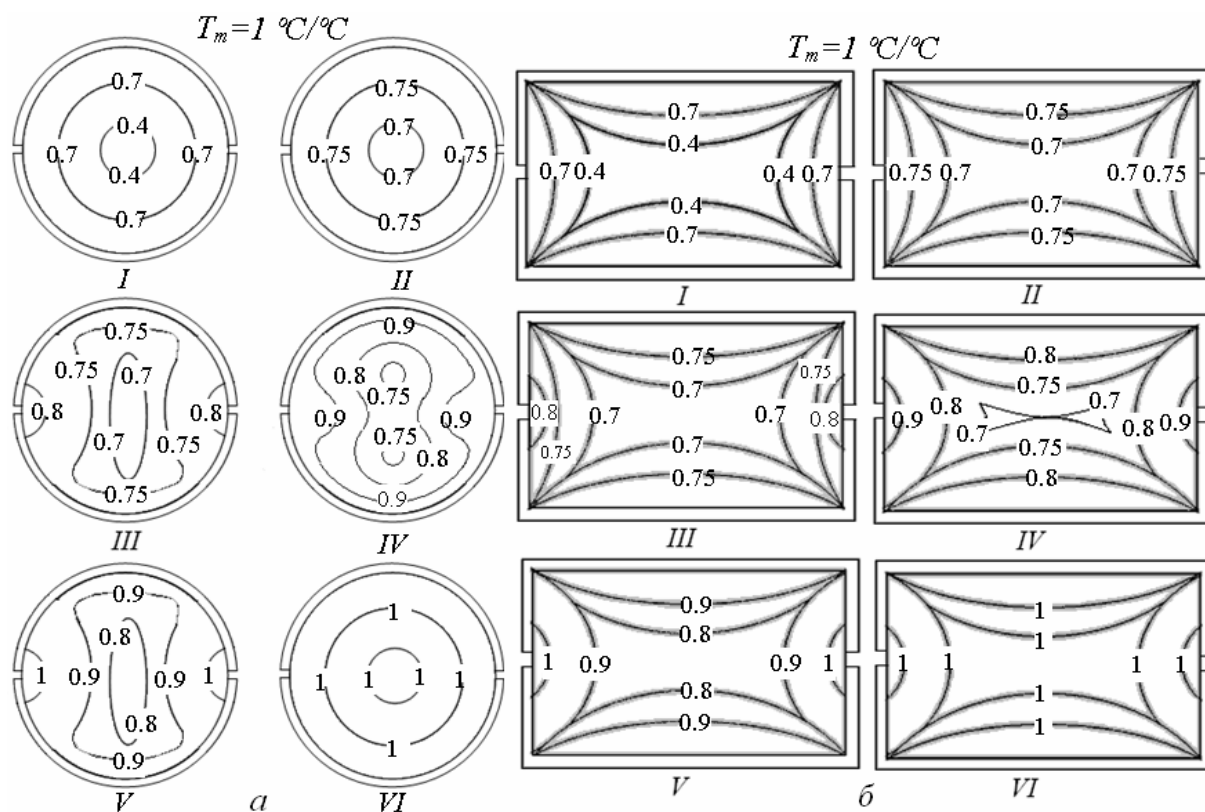


Рис. 17. Розподілення полів температур за різних моментів часу в термостаті циліндричної (а) та паралелепіпедної (б) форм, отримані за розв'язком задачі про розподіл температури з використанням методу R-функцій: I, II – нагрівання; III, IV, V – тепломасообмін; VI – рівновага

У п'ятому розділі «Технічна реалізація апаратів з використанням індукованого тепломасообміну» визначено вимоги до елементів конструкції апаратів з ІнтМО, а саме: конструкцію внутрішнього об'єму термостата (забезпечення наявності щонайменше двох рівноважних станів); конструкцію та фільтраційні властивості обтюратора (забезпечення наявності енергетичного бар'єра); наявність потоку повітря, що рухається відносно обтюратора (забезпечення наявності флуктуації в об'ємі обтюратора); спосіб підведення теплоти до внутрішнього середовища термостата (забезпечення термостатування).

Розроблено концептуальні рішення конструкцій апаратів з ІнтМО для виконання наступних технологічних операцій, які застосовуються в харчовій промисловості.

1. Відзначено, що сушіння з ІнтМО представлене ЗТП-сушінням (рис. 18 а). При цьому термостатом є сушильна камера, внутрішня частина термостата обмежена функціональною ємністю (ФЄ). Термостатування, масовідведення та створення флуктуації забезпечується потоком повітря, що омиває ФЄ.

Розроблено варіації технічної реалізації апаратів для зневоднення з ІнтМО. За одним із способів підведення теплоти до внутрішньої частини термостата організується кондуктивним або радіаційним способом (рис. 18 б), а обдування обтюраторів проводиться повітрям із температурою виробничого приміщення – $T_{нов} = T_{\infty}$.

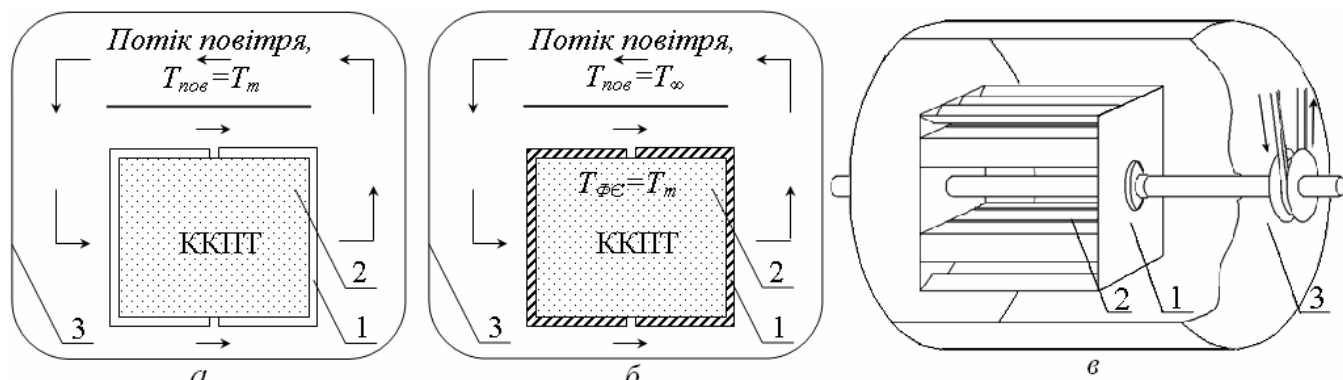


Рис. 18. Схеми вузлів апаратів для сушіння з ІнтМО: а – із конвективним теплопідведенням; б – із кондуктивним теплопідведенням; в – із ФЄ, що рухається відносно повітря; 1 – ФЄ; 2 – ККПТ; 3 – сушильна камера

Інша технічна реалізація базується на уявленні про відносність руху та полягає в обертанні з визначеною кутовою швидкістю ФЄ відносно повітря, що

знаходиться в стані спокою (рис. 18 в). При цьому термостатування забезпечується конвективним або радіаційним способом.

2. Одним із способів реалізації гідротермічної обробки з ІнтМО є закривання зазорів з обтюраторами для проварювання сировини та відкривання їх для подальшого сушіння (рис. 19 а). Інший спосіб полягає в зупинці нагрітого до визначеної температури повітря для проварювання сировини в ФЄ з кондуктивним підведенням теплоти та наступним відновленням руху повітря для її зневоднення (рис. 19 б).

3. Випарювання, концентрування або згущення з ІнтМО відповідно до концептуального рішення

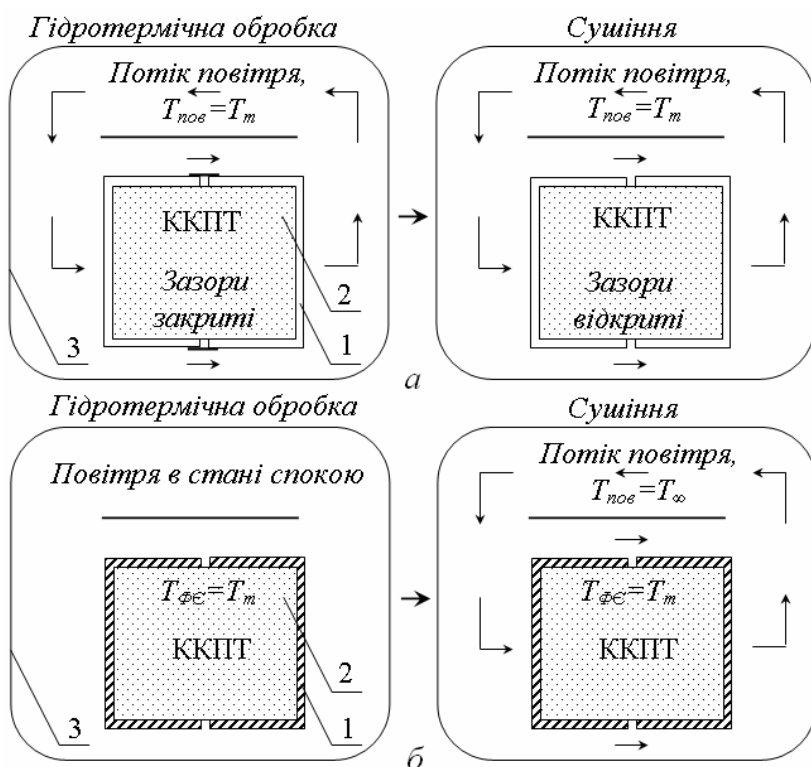
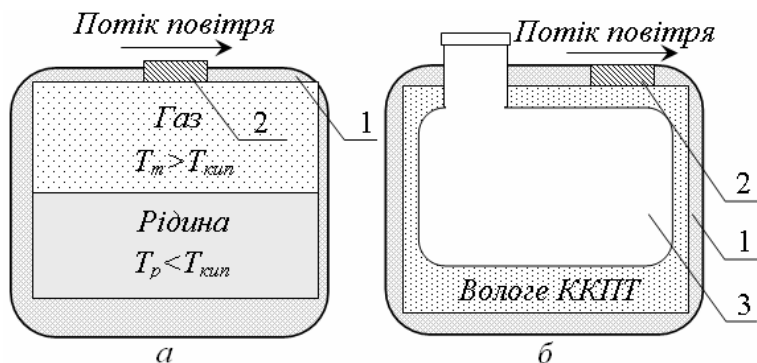


Рис. 19. Схеми апаратів для гідротермічної обробки ККПТ із використанням ефекту ІнтМО: а – способом із закриванням зазорів; б – способом із зупинкою потоку повітря; 1 – тепломасообмінний модуль; 2 – ККПТ; 3 – робоча камера

(рис. 20 а) проводиться у термостаті, внутрішнє середовище якого являє закритою ємність із обтюратором у верхній частині. Слід зазначити, що температуру термостата (T_m) при цьому можна обирати більшою за температуру кипіння рідини ($T_{кип}$), яку містить сировина, без ризику її закипання або підгорання.

4. Організація охолодження (рис. 20 б) можлива завдяки наявності високих



градієнтів температури в ККПТ у внутрішній частині термостата під час ІнтМО. Різниця температур між шарами вологого ККПТ усередині термостата під час ІнтМО на відстані 5...10 мм досягає 50...60% температури термостата. Термостатування можливе завдяки такій особливості ІнтМО, як сталість температури рідини за умови наявності певної її кількості всередині термостата.

Рис. 20. Схеми апаратів для випарювання, концентрування, згущення з ІнтМО (а) (1 – термостат; 2 – обтюратор) та для охолодження і термостатування з ІнтМО (б) (1 – термостат; 2 – обтюратор; 3 – ємність для сировини)

5. Ректифікація, перегонка або дистиляція з ІнтМО

відповідно до концептуального рішення реалізується за схемою на рис. 21, де наведений приклад розділення суміші трьох рідин з різною температурою кипіння ($T_{кип1} < T_{кип2} < T_{кип3}$). У першому термостаті проводиться відділення рідини 1 та рідини 2 від рідини 3. Потік повітря з паром рідин 1 та 2 надходить до конденсатора 3, де пари рідин 1 та 2 конденсуються та надходять до другого термостата (4). У другому термостаті проводиться відділення рідини 1 від рідини 2. Кількість рідин, які підлягають розділенню, визначає кількість ступенів «термостат – конденсатор».

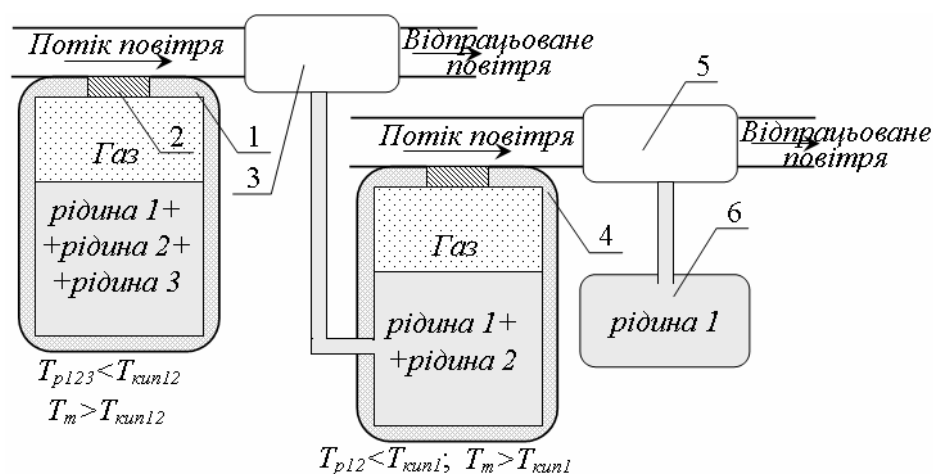


Рис. 21. Схема апарата для ректифікації, перегонки або дистиляції з використанням ефекту ІнтМО: 1, 4 – термостати; 2 – обтюратор; 3, 5 – конденсатори; 6 – збірник для рідини

Відмічено, що наведені рішення апаратів з використанням ІнТМО є універсальними. Їх універсальність полягає в можливості використання одного апарата для виконання будь-якої із описаних технологічних операцій за мінімальних конструкційних змін у наявному апараті.

На основі концептуальних рішень розроблено апарат безперервної дії для гідротермічної обробки круп з ІнТМО, де кінцевою продукцією є швидковідновлювані каші, що не потребують варіння (рис. 22).

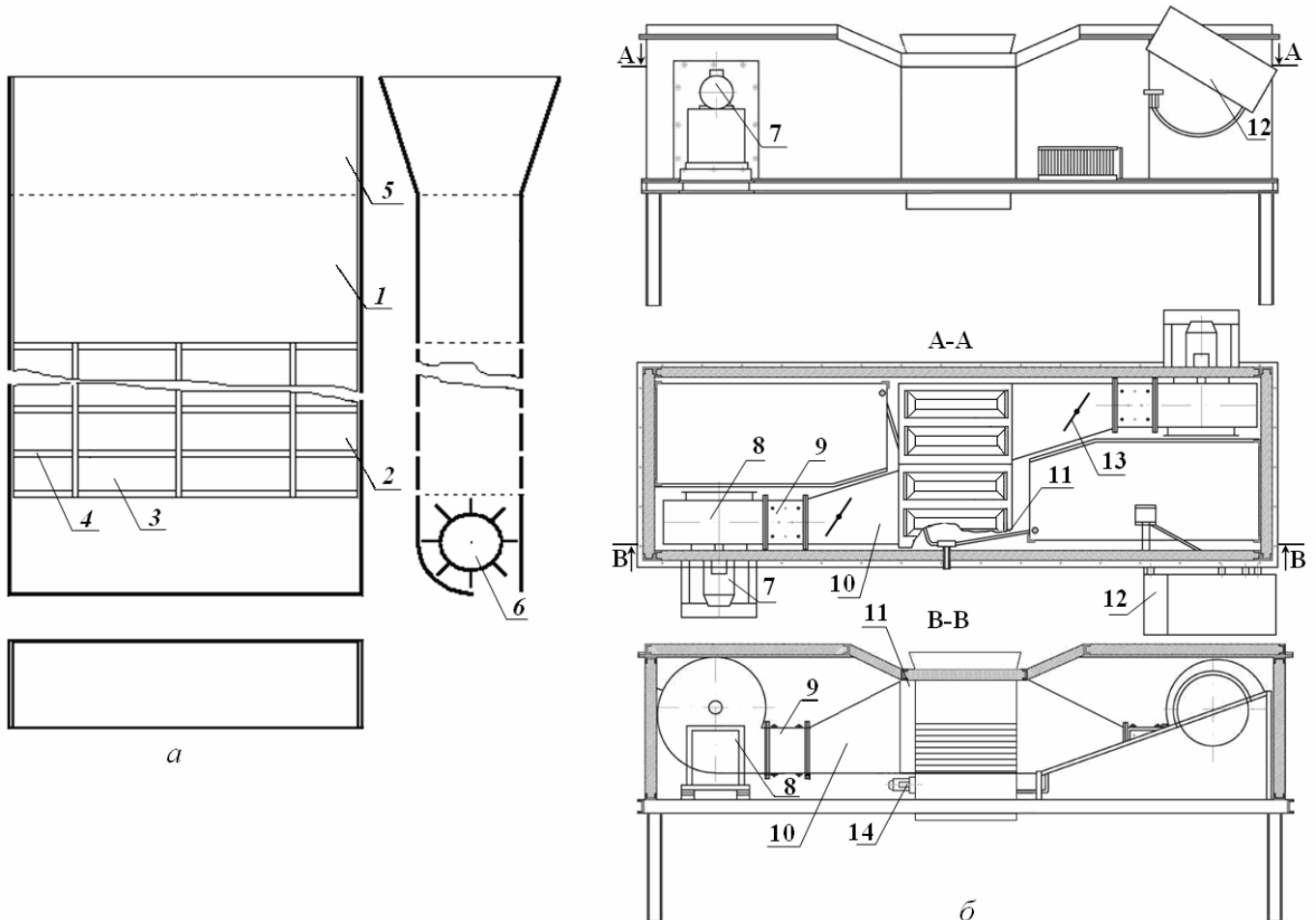


Рис. 22. Тепломасообмінний модуль (а) та апарат безперервної дії (б) для гідротермічної обробки круп з ІнТМО: 1, 2 – частини ТМО-модуля, відповідно, для проварювання сировини та сушіння; 3 – теплообмінні поверхні; 4 – зазори; 5 – завантажувальний бункер; 6 – вивантажувальний шнек; 7 – електродвигун; 8 – вентилятор; 9 – електрокалорифери; 10 – повітровід; 11 – тепломасообмінна камера; 12 – пульт керування; 13 – шибер; 14 – двигун шнека з редуктором

Розраховано апарат для гідротермічної обробки круп з ІнТМО за емпіричними і стандартними рівняннями теплового й масового балансів з урахуванням особливостей ефекту, що використовується. Відзначено, що основною відмінністю розрахункових рівнянь є наявність доданку E_A^* – питомої енергії активації ІнТМО (на кг випаруваної води), яка забезпечується за величиною роботою потоку повітря, що рухається відносно обтюратора термостата. Відзначено, що основне рівняння,

яке характеризує зміну ентальпії пароповітряної суміші в апараті для гідротермічної обробки круп з ІнТМО, має вигляд:

$$I_2 = I_1 + \frac{1}{l} \cdot \left(l(I_2 - I_0) - E_A^* + \frac{m_{mat}^{вих}}{A_0 \cdot m_{c.в.}} c_{mat}^{вих} \cdot (t_{вих} - t_{ex}) + q_{вит.нов.} - c_{c.в.} \cdot t_{ex} \right), \quad (25)$$

де I_0, I_1, I_2 – ентальпія повітря, що надходить до блока калориферів, повітря, що надходить у тепломасообмінну камеру та виходить із неї, Дж/кг сух. пов.; $c_{c.в.}$ – теплоємність системної води, Дж/(кг·К); l – питомі витрати повітря, кг/кг вип. води; t_{ex} та $t_{вих}$ – температура сировини на вході та виході термостата, К; A_0 – частина системної води, що бере участь у ІнТМО; $m_{c.в.}$ – маса системної води в термостаті, кг; $c_{mat}^{вих}$ та $m_{mat}^{вих}$ – теплоємність та маса кінцевої продукції, Дж/(кг·К); $q_{вит.нов.}$ – втрати теплоти з витіканням повітря, Дж/кг вип. води.

Розрахунки довели, що економічний ефект розробки досягається за рахунок скорочення кількості використовуваних технологічних операцій, виконання основних операцій в одному апараті і, як наслідок, зменшення металоємності обладнання і витрат на оплату праці, а також за рахунок скорочення енерговитрат на одиницю продукції більш ніж у 1,3 разу у порівняно з традиційними способами. При цьому в апараті можна проводити гідротермічну обробку, сушіння, термостатування, випарювання за умови використання відповідного ТМО-модуля, що доводить його універсальність. Розробки підтверджені патентом України на корисну модель «Установка для гідротермічної обробки та сушіння крупи». Розроблено проект ТУ У 15.8-01566330-276:2012 «Каші швидковідновлювані».

У шостому розділі «Функціонально-технологічні властивості та показники якості продукції, отриманої з використанням індукованого тепломасообміну» дослідженнями окремих функціонально-технологічних властивостей та показників якості продукції, отриманої після таких технологічних операцій, як сушіння, гідротермічна обробка та випарювання з ІнТМО, доведено високу якість отриманої продукції порівняно з аналогічною продукцією, що отримується традиційними способами. Виконання означених технологічних операцій проводилися у створених прототипах термостатів, конструкція яких обумовлена змістом операції, що виконується.

Спектрофотометричними дослідженнями сушеної чорниці, отриманої в термостаті з ІнТМО зі штучно створеним обтюратором (рис. 18 б), встановлено: зміна кольорового тону та чистоти кольору отриманої продукції відрізняється від вихідної сировини в межах похибки (не більше ніж на 5...7%). Визначено, що втрати вітаміну С відносно вихідної сировини для чорниці, отриманої сушінням в термостаті з ІнТМО за температури 70 °С, становлять 15%, що майже в 2,3 разу менше порівняно зі зразком отриманим конвективним сушінням за тієї ж температури. Відзначено, що перевагами отриманої продукції над продукцією, одержаною ЗТП-сушінням, є відсутність спеціальної попередньої підготовки з внесенням добавок (крохмаль, метилцелюлоза).

Спектрофотометричними дослідженнями (рис. 23) концентрату соку чорниці, отриманого випарюванням у термостаті з ІнТМО, та концентрату, отриманого у вакуум-випарному апараті, доведено, що з точки зору збереження вихідних кольорних

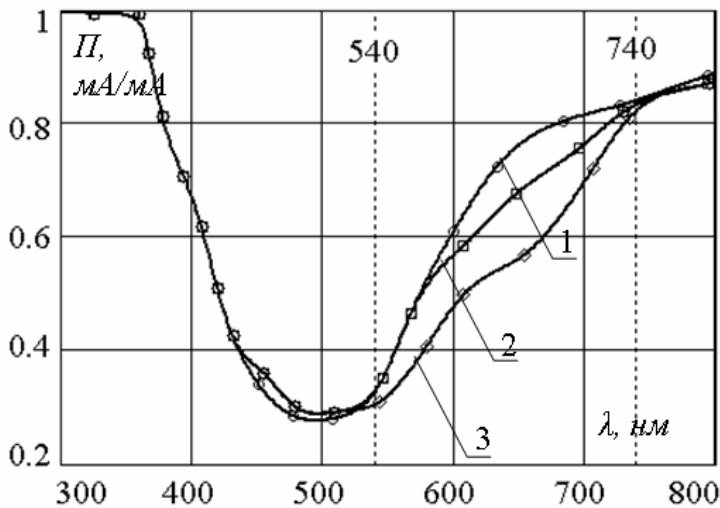


Рис. 23. Коефіцієнт пропускання для вихідної сировини (1) та концентратів соку чорниці, отриманих випарюванням до 30 °Вгіх: 2 – у термостаті з ІнТМО за температури термостата 105...108 °С; 3 – у вакуум-випарному апараті за температури 90...95 °С

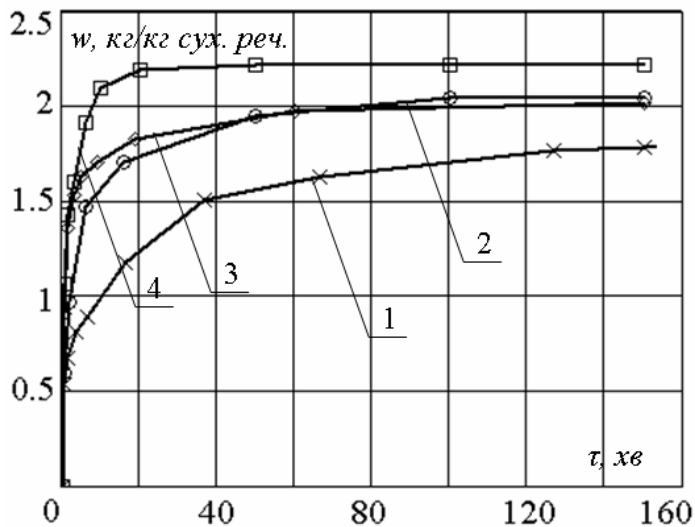


Рис. 24. Кінетика набухання гречаної крупи (1) та швидковідновлюваних каш отриманих: 2 – плющенням гречаної крупи; 3 – проварюванням гречаної крупи та наступним конвективним сушінням; 4 – обробкою з ІнТМО

властивостей сировини вищу якість має зразок, отриманий випарюванням у термостаті з ІнТМО (площа під спектром у діапазоні довжин хвиль від 550 до 740 нм для зразка, отриманого випарюванням у термостаті з ІнТМО, менша за площу під спектром контрольного зразка на 6,5%, а під спектром від зразка, отриманого випарюванням у вакуум-випарному апараті – на 18%). Доведено, що очевидною перевагою випарювання в термостаті з ІнТМО, з точки зору збереження вихідних властивостей сировини, є те, що випарювання відбувається за обмеженого доступу кисню повітря до сировини та за низького температурного впливу.

Доведено швидковідновлювані каші, отримані гідротермічною обробкою круп з ІнТМО, після відновлення представляють собою густу однорідну кашу, яка може використовуватися як гарнір для других страв. Установлено, що органолептичні показники розробленої продукції, а саме зовнішній вигляд, колір, смак, запах, задовольняють норми. Тензометричними та мікробіологічними дослідженнями встановлено: ці напівфабрикати мають тривалі терміни зберігання, які становлять не менше ніж 12 міс. від дати виробництва за температури не більше ніж 25 °С

та відносної вологості не більше ніж 75%. Дослідженнями пористості та відновлюваності сировини й швидковідновлюваних каш установлено: під час гідротермічної обробки з ІнТМО відбувається розвиток пористої структури сировини. Дослідження відновлюваності каш (рис. 24) підтвердили, що розроблені

каші поглинають воду під час приготування в 2...2,5 разу швидше, ніж швидковідновлювані каші, отримані традиційними способами, що підвищує їх функціонально-технологічні властивості.

Результати, отримані в роботі, пройшли апробацію на ТОВ «Терра», ТОВ «Спільне україно-німецьке підприємство «Злаки», ПСП ім. Т.Г. Шевченка. Результати досліджень упроваджені в навчальний процес ХДУХТ у дисципліну «Технологія сушіння плодів та овочів» у формі доповнення змісту лекцій дисципліни новими науковими даними та нових лабораторних робіт.

ВИСНОВКИ

1. Сформульовано гіпотезу ефекту ІнТМО, яка полягає в індукуванні за рахунок флуктуацій переходу системи «рідина – пара» від нестійкої рівноваги до стійкої за умови термостатування. Ефект супроводжується розсіюванням теплоти термостата за рахунок видалення з нього рідини через фазовий перехід. Установлено, що потік маси рідини, яка виноситься із термостата в газовому стані, індукує тепловий потік, який розсіюється всередині термостата. Виявлено необхідні та достатні умови організації та керування ефектом ІнТМО, за якими сформульовано наукову концепцію роботи.

2. Доведено, що за ефекту ІнТМО система «оточуюче середовище – внутрішнє середовище термостата» є проточною та динамічною по відношенню до теплової енергії та маси, де спостерігаються процеси самоорганізації, які й зумовлюють ефективне розсіювання теплової енергії. Відзначено, що площа під негативною ділянкою фазової траєкторії на фазовій площині, яка становить від 10 до 30% загальної площі та яка пропорційна частині тепловмісту внутрішнього середовища термостата, витраченому на фазовий перехід рідини цього середовища в газовий стан, є критерієм енергоефективності ІнТМО.

3. Обґрунтовано введення поняття «системна вода» як одного із параметрів порядку ІнТМО та доцільність розрахунку мольних концентрацій для систем «системна вода – складові харчової системи». Доведено, що внесення пектину, цукру, еламіну, крохмалю, концентратів тваринних білків (Сканпро 91, 95), напівфабрикату кісткового харчового в плодово-ягідну сировину та сировину тваринного походження приводить до зменшення на 10...20% кількості системної води, яка бере участь у ІнТМО. Дослідженнями динамічної поведінки модельних тіл із крохмалю та з клейковини ЕПР-методом встановлено, що системна вода досліджуваних тіл має дві форми зв'язку з сухими речовинами. Установлено, що для тіл із крохмалю наявні три структури, які визначаються молярною масою високомолекулярного сполучення, яким є крохмаль. Відзначено, що частина системної води, яка не бере участі в ІнТМО, визначає вимоги до умов зберігання харчової сировини та продуктів.

4. Дослідженнями тепломасообміну в прототипі апарата для випарювання, концентрування та згущення з ІнТМО, який являє термостат з обтюратором, що утримує рідину та газ, установлено, що кипіння за температури термостата від 100 до 140 °С ні для спирту, ні для води, ні для їх суміші не відбувалося за атмосферного тиску. Установлено, що етиловий спирт та вода переходять до

газового стану під час ІнтМО окремо. Закінчення видалення рідкої фази компонентів суміші фіксується за особливостями кінетики температури, що рекомендовано використовувати для процесів ректифікації, перегонки або дистиляція без фази кипіння в термостаті з ІнтМО.

5. Дослідженнями ІнтМО за наявності в термостаті твердої, рідкої та газової фаз із розривами між фазами встановлений основний параметр порядку ефекта ІнтМО – наявність суцільності газового середовища всередині термостата. Доведено, що у разі забезпечення цього параметра порядку ефект ІнтМО спостерігається навіть за умови просторового відділення сухих речовин і рідини, що має практичну цінність для виконання операцій ароматизації або одночасної гідротермічної обробки з сушінням з просторовим відділенням компонент оброблюваної сировини в одному універсальному апараті. Моделюванням обробки з ІнтМО сировини з високою поруватістю або високим ступенем усадки (об'єми пустот до 30...50% внутрішнього об'єму термостата) та сировини з частинками, що мають газонепроникні включення, встановлено, що тривалість ІнтМО для окремих об'ємів ККПТ по всьому внутрішньому об'єму термостата відрізняється не більше ніж на 10%. Доведено, що особливості перетікання ІнтМО в будь-якому виділеному об'ємі внутрішнього середовища термостата відбивається на характері його перетікання для інших виділених об'ємів. Установлено умови здійснення обробки сировини різної природи в одному апараті без її змішування. Розрахунками встановлено: питома продуктивність робочої поверхні термостата в 1,7 разу більша порівняно з продуктивністю випаровування з відкритої поверхні води за тих же температури (75 °С) та швидкості руху повітря (10 м/с).

6. Установлено, що дефіцит теплоти, що надходить від стінок термостата до його внутрішнього середовища і становить 25...30% від теплоти, що витрачається на нагрівання внутрішнього середовища та фазовий перехід рідини, компенсується зовнішньою роботою потоку повітря, який рухається відносно обтюратора. Експериментальними дослідженнями доведено: температура і витрати повітря, що рухається відносно обтюратора, не чинять істотного впливу на тривалість ІнтМО і не є баластом енергії. Дослідженнями кінетики потоку теплоти, що витрачається всередині термостата, за швидкості потоку повітря від 4 до 13 м/с, який рухається відносно обтюраторів, установлено, що інтенсивність ІнтМО може регулюватися даним керуючим параметром у межах 15...20%. Визначений діапазон кутів обдування (від 35° до 55°), за яких енергоефективність ІнтМО менша вдвічі порівняно з кутами, за яких досягається найбільша енергоефективність (0° та 90°).

Експериментальні дослідження довели феноменологічну гіпотезу ефекту ІнтМО.

7. Розв'язано класичну задачу про розподіл температури і вологовмісту в термостатах циліндричної та паралелепіпедної форм методом R-функцій сумісно з методом малого параметра та проєкційним методом Бубнова–Гальоркіна. Обґрунтовано проведення фізико-математичного моделювання ефекту ІнтМО постановкою та вирішенням теплової задачі, де масообмін ураховано через функцію розвитку потужності дисипативних структур. Доведено, що ця модель є коректною для описання ІнтМО та застосування для інженерних розрахунків апаратів з ІнтМО.

8. Розроблено концептуальні рішення конструкцій нових апаратів з ІнТМО для виконання таких технологічних операцій харчової промисловості: сушіння; гідротермічної обробки; випарювання, згущення сировини; ректифікації, перегонки, дистиляції розчинів, суспензій; охолодження, термостатування. На основі концептуальних рішень за запропонованими і стандартними рівняннями теплового й масового балансів розраховано апарат для гідротермічної обробки круп з використанням ІнТМО, де кінцевою продукцією є швидковідновлювані каші. Доведено, що економічний ефект розробки досягається за рахунок скорочення кількості технологічних операцій, що використовуються, виконання основних операцій в одному універсальному апараті та за рахунок скорочення енерговитрат на одиницю продукції більш ніж у 1,3 разу порівняно з існуючими способами. Результати, отримані в роботі, пройшли апробацію на ТОВ «Терра», ТОВ «Спільне україно-німецьке підприємство «Злаки», ПСП ім. Т.Г. Шевченка. Результати досліджень упроваджені в навчальний процес ХДУХТ.

9. Установлено, що зміна кольорового тону та чистоти кольору сушеної чорниці, отриманої в термостаті з ІнТМО нової конструкції зі штучно створеним обтюратором, відрізняється від вихідної сировини не більше ніж на 5...7%, втрати вітаміну С становлять 15%, що в 2,3 разу менше порівняно зі зразком, отриманим конвективним сушінням. Спектрофотометричними дослідженнями концентрату соку чорниці, отриманого випарюванням з ІнТМО (відмінність від вихідної сировини на 6,5%), доведено його вищу якість порівняно з концентратом, отриманим у вакуум-випарному апараті (відмінність від вихідної сировини на 18%). Дослідженнями показників якості швидковідновлюваних каш, отриманих гідротермічною обробкою з ІнТМО, установлено, що розроблена продукція поглинає воду під час приготування в 2...2,5 разу швидше, ніж каші, отримані традиційними способами, що підвищує їх функціонально-технологічні властивості; при цьому мікробіологічні та органолептичні (зовнішній вигляд, колір, смак, запах) показники розробленої продукції задовольняють норми.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Погожих М. І., Пак А. О., Цуркан М. М. Сушіння плодово-ягідної сировини способом змішаного теплопідводу зі штучним пороутворенням: монографія. Харків: ХДУХТ, 2009. 102 с. *Внесок здобувача: розробка технологічних схем та конструкційних особливостей сушарки для переробки плодово-ягідної сировини способом змішаного теплопідводу зі штучним пороутворенням.*

2. Вода в пищевых продуктах и для пищевых продуктов: монография / Н. И. Погожих, В. В. Евлаш, А. И. Торяник, А. О. Пак и др. Харьков: ХГУПТ, 2013. 177 с. *Внесок здобувача: отримання нових наукових даних про стан та структуру системної води харчових систем із крохмалю методом ЕПР-спінових міток, участь в узагальненні висновків.*

3. Гідротермічна обробка круп із використанням принципів сушіння змішаним теплопідводом : монографія / М. І. Погожих, А. О. Пак та ін. Харків: ХДУХТ, 2014. 170 с. *Внесок здобувача: постановка завдань дослідження та розробка*

концептуального рішення апарата для гідротермічної обробки із застосуванням сушіння змішаним теплопідводом, участь в узагальненні результатів.

4. Перцевой Ф. В., Теймурова А. Т., Погожих М. І., Пак А. О. Вивчення механізму дії добавок Сканпро на структурно-механічні властивості драглів // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка: зб. наук. пр. / Харк. нац. техн. ун-т сільськ. госп-ва ім. П. Василенка. Х.: ХНТУСГ, 2008. Вип. 74. С. 146–153. *Внесок здобувача: участь у постановці завдань дослідження, проведення експериментальних досліджень з визначення видів зв'язку системної води агарових драглів калориметричним методом.*

5. Погожих М. І., Пак А. О. Метод исследования интенсивности испарения влаги с поверхности материала в процессе сушки // Наукові праці ОНАХТ: зб. наук. пр. / Одеськ. нац. акад. харч. техн. Одеса: ОНАХТ, 2008. Вип. 32(35). С. 97–100. *Внесок здобувача: розробка конструкції пристрою для дослідження інтенсивності випаровування води з харчової сировини під час сушіння.*

6. Погожих М. І., Пак А. О., Жеребкін М. В. Исследование кинетики температуры и кинетики сушки при получении быстровосстанавливаемой каши // Наукові праці ОНАХТ: зб. наук. пр. / Одеськ. нац. акад. харч. техн. Одеса: ОНАХТ, 2009. Вип. 35. Т. 2. С. 101–104. *Внесок здобувача: постановка завдання дослідження, участь у розробці експериментального стенду та методиці проведення вимірювань кінетики температури та маси сировини під час гідротермічної обробки.*

7. Погожих М. І., Пак А. О., Жеребкін М. В. Дослідження плинності вологості сировини в функціональній ємності прямокутного перерізу // Східно-європейський журнал передових технологій. 2009. № 6/5(42). С. 56–59. *Внесок здобувача: постановка завдання дослідження, розробка конструкції пристрою для дослідження плинності вологості харчової сировини, визначення діапазону раціональних значень товщини тепломасообмінного модуля.*

8. Постнов Г. М., Пак А. О., Чебанов М. А. Визначення енергії ультразвукових коливань, що розсіялась під час ультразвукової обробки м'ясної сировини // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. праць / Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. Х.: ХДУХТ, 2009. Вип. 1. С. 518–523. *Внесок здобувача: участь у постановці завдань дослідження, розробка алгоритму розрахунку результатів експериментів з дослідження розсіяної енергії ультразвукових коливань під час ультразвукової обробки м'ясної сировини.*

9. Міщенко Т. В., Погожих М. І., Пак А. О. Колориметричне дослідження сушеної чорної смородини // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. праць / Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. Х.: ХДУХТ, 2009. Вип. 2. С. 436–442. *Внесок здобувача: участь у постановці завдань дослідження, розробка математичного алгоритму та здійснення математичної обробки результатів експериментів з колориметричних досліджень сировини з високим вмістом флавоноїдів.*

10. Дюкарева Г. І., Головка Т. М., Пак А. О., Серік М. В. Дослідження впливу НКХ та еламіну форми зв'язку вологи в паштетах калориметричним методом //

Східно-європейський журнал передових технологій. 2009. № 4/9 (40). С. 32–34. *Внесок здобувача: визначення форм зв'язку системної води сировини тваринного походження з додаванням напівфабрикату кісткового харчового низькотемпературним калориметричним методом та встановлення закономірностей змін у формах зв'язку води в ній під час зберігання.*

11. Пак А. О., Євтушенко А. В. Дослідження стану вологи пастоподібних напівфабрикатів у процесі заморожування, розморожування, зберігання // Східно-європейський журнал передових технологій. 2010. № 3/10(45). С. 54–56. *Внесок здобувача: визначення низькотемпературним калориметричним методом форм зв'язку системної води сировини рослинного походження з додаванням пектину та цукру і встановлення закономірностей змін у формах зв'язку води в ній під час зберігання.*

12. Одарченко А. М., Пак А. О., Євтушенко А. В. Дослідження змін вмісту каротиноїдів та вітаміну С фруктових начинок за різних температур зберігання // Східно-європейський журнал передових технологій. 2010. № 1/6(43). С. 65–68. *Внесок здобувача: розробка алгоритму математичної обробки експериментальних досліджень з визначення вмісту вітаміну С та каротиноїдів у рослинній сировині з додаванням пектину та цукру.*

13. Перцевой Ф. В., Дьяков О. Г., Пак А. О., Обозна М. В. Використання фізичних методів досліджень для вивчення вмісту вільної та зв'язаної вологи сирного продукту м'якого // Харчова наука та технологія. 2011. № 2. С. 74–77. *Внесок здобувача: визначення низькотемпературним калориметричним методом форм зв'язку системної води молокової сировини з додаванням пектину та крохмалю і встановлення закономірностей змін у формах зв'язку води в ній під час зберігання.*

14. Головка М. П., Пак А. О., Чуйко М. М. Вивчення гігроскопічних властивостей макаронних виробів, збагачених біоорганічними сполуками кальцію // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства та торгівлі : зб. наук. пр. / Харк. держ. ун-т харч. та торг. Х.: ХДУХТ, 2011. Вип. 2. С. 245–250. *Внесок здобувача: визначення тензометричним методом форм зв'язку системної води крохмальутримуючої сировини і встановлення закономірностей змін у формах зв'язку води в ній під час зберігання.*

15. Погожих М. І., Ромоданов І. С., Пак А. О. Методика дослідження стану вологи в капілярно-пористих колоїдних тілах методом ЕПР-спінових міток // Східно-європейський журнал передових технологій. 2011. № 2/6(50). С. 22–24. *Внесок здобувача: участь у постановці завдань дослідження, розробка алгоритму математичної обробки ЕПР-спектрів спінміченої сировини, написання програм для розрахунку в пакеті MathCad.*

16. Янчева М. О., Пак А. О., Яковлева Ю. В. Вплив композиції кріопротекторної дії на кількість вимороженої вологи в м'ясних січених напівфабрикатах // Обладнання та технології харчових виробництв: зб. наук. пр. / Дон. нац. ун-т ек. та торг. ім. М. Туган-Барановського. Донецьк: ДонНУЕТ ім. М. Туган-Барановського. 2011. Вип. 27. С. 281–285. *Внесок здобувача:*

визначення форм зв'язку системної води сировини тваринного походження та встановлення закономірностей змін у формах зв'язку води в ній під час зберігання.

17. Погожих М. І., Пак А. О., Міщенко Т. В., Жеребкін М. В. Внутрішні чинники процесу гідротермічної обробки круп з використанням принципів ЗТП-сушіння // Східно-європейський журнал передових технологій. 2011. № 5/3(53). С. 60–63. *Внесок здобувача: проведення теоретичного аналізу чинників процесу гідротермічної обробки круп з використанням реалізації індукованого тепломасообміну для сушіння харчової сировини.*

18. Погожих М. І., Пак А. О., Чеканов М. А., Жеребкін М. В. Математична модель кінетики температури сировини під час ЗТП-сушіння // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях : зб. наук. праць / Нац. техн. ун-т «ХПІ». Х.: НТУ«ХПІ», 2011. № 43. С. 7–12. *Внесок здобувача: розробка теоретичної моделі кінетики температури сировини під час застосування для її сушіння індукованого тепломасообміну.*

19. Погожих М. І. Пак А. О., Жеребкін М. В. Дослідження умов зберігання та показників якості швидковідновлювальних каш, отриманих сушінням змішаним теплопідводом // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства та торгівлі : зб. наук. праць / Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. Х.: ХДУХТ, 2011. Вип. 1(13). С. 21–26. *Внесок здобувача: участь у постановці завдання дослідження, встановлення закономірностей змін показників якості швидковідновлюваних каш під час їх зберігання.*

20. Погожих М. І., Пак А. О., Жеребкін М. В. Пористість швидковідновлюваної каші, отриманої сушінням змішаним теплопідводом // Наукові праці ОНАХТ: зб. наук. праць / Од. нац. акад. харч. техн. Одеса: ОНАХТ, 2011. Вип. 40. Т. 1. С. 54–57. *Внесок здобувача: участь у постановці завдань дослідження та написання програм для розрахунку експериментальних результатів для швидковідновлюваних каш, отриманих тензометричним методом, в пакеті MathCad.*

21. Погожих М. І., Пак А. О., Жеребкін М. В. Функція розподілення потужності дисипативних структур всередині ФЄ під час ЗТП-сушіння // Східно-європейський журнал передових технологій. 2012. № 2/12(56). С. 63–68. *Внесок здобувача: розробка алгоритму знаходження аналітичного вигляду функції розвитку потужності дисипативних структур у колоїдних капілярно-пористих тілах під час застосування індукованого тепломасообміну для зневоднення даної сировини.*

22. Погожих М. І., Пак А. О., Пак А. В., Жеребкін М. В. Дослідження системної вологи крохмалю зернових культур методом ЕПР // Східно-європейський журнал передових технологій. 2012. № 5/6(59). С. 62–66. *Внесок здобувача участь у постановці завдань дослідження, розробка алгоритму математичної обробки ЕПР-спектрів вологої спінміченої сировини під час її зневоднення, написання програм для обробки експериментальних даних.*

23. Погожих М. І., Пак А. О., Пак А. В., Мольський О. С. Дослідження системної води крохмалів тензометричним та ЕПР- методом // Технологічний аудит

та резерви виробництва. 2013. № 2/1(10). С. 31–35. **Стаття у виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз.** *Внесок здобувача: участь у постановці завдань дослідження, встановленні закономірностей динамічної поведінки системної води колоїдних капілярно-пористих тіл із крохмалю в залежності від його молярної маси та молярної концентрації.*

24. Погожих М. І., Пак А. О., Чеканов М. А., Іштван Є. О., Павлюк І. М. Дослідження системної води харчової сировини термодинамічними та молекулярно-кінетичними методами // Східно-європейський журнал передових технологій. 2014. № 5/11(71). С. 42–46. **Стаття у фаховому виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз.** *Внесок здобувача: узагальнення результатів експериментальних досліджень та наведення кореляції між даними, отриманими різними молекулярно-кінетичними та термодинамічними методами.*

25. Погожих М. І., Пак А. О., Пак А. В., Жеребкін М. В. Вплив параметрів руху сушильного агента на кінетику сушіння змішаним теплопідводом // Східно-європейський журнал передових технологій. 2014. № 2/12(68). С. 4–8. **Стаття у фаховому виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз.** *Внесок здобувача: розробка конструкції пристрою для дослідження впливу параметрів руху потоку повітря відносно обтюраторів під час застосування індукованого тепломасообміну для сушіння вологої сировини, участь в узагальненні висновків.*

26. Дюкарева Г. И., Пак А. О., Гасанова А. Э. Влияние эламина и стевियोзида на поверхностное натяжение яичной массы // Товары і ринки. 2014. № 1(17). С. 89–97. *Внесок здобувача: розробка конструкції пристрою та методики дослідження поверхневого натягу харчових систем в залежності від вмісту системної води в них та доданої кількості еламіну та стевіозиду, участь в узагальненні висновків.*

27. Diukareva Galina, Pak Andrii, Gasanova Anna. Determination of storage conditions for new biscuits using their sorption isotherms // Ukrainian Food Journal. 2014. Vol. 3. Iss. 2. P. 249–256. **Стаття у фаховому виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз.** *Внесок здобувача: розробка алгоритму розрахунку активності води харчової сировини тензометричним методом, здійснення математичної обробки результатів експериментів, участь в узагальненні висновків.*

28. Погожих М. І., Чеканов М. А., Пак А. О. Концепція підвищення енергоефективності технологічних процесів харчових виробництв // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. пр. / Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. Х.: ХДУХТ, 2015. Вип. 1(21). С. 139–147. *Внесок здобувача: участь у розробці концепції підвищення енергоефективності процесів харчових виробництв, написання програм для обробки експериментальних даних.*

29. Погожих М. І., Синєкоп М. С., Торяник Д. О., Пак А. О. Наближений розв'язок задач теорії сушіння капілярно-пористих тіл складної форми // Science Rise. 2016. № 3/2(20). С. 6–11. **Стаття у виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз.** *Внесок здобувача: участь у постановці*

завдання дослідження, здійснення математичного моделювання кінетики вологовмісту та температури у капілярно-пористому тілі циліндричної форми за межових умов третього та першого роду під час застосування індукованого тепломасообміну для сушіння даної сировини, участь в узагальненні висновків.

30. Погожих М. І., Синєкоп М. С., Пак А. О., Чеканов М. А. Сумісне використання R-функцій і проєкційного методу в задачах теорії сушіння // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. пр. / Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. Х.: ХДУХТ, 2016. Вип. 1(23). С. 284–293. *Внесок здобувача: участь у постановці завдання дослідження, здійснення математичного моделювання кінетики вологовмісту та температури у капілярно-пористому тілі паралелепіпедної форми за межових умов третього та першого роду під час застосування індукованого тепломасообміну для сушіння даної сировини, участь в узагальненні висновків.*

31. Pogozhikh M., Pak A. The development of an artificial energotechnological process with the induced heat and mass transfer // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. № 1/8(85). P. 50–58. **Стаття у фаховому виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз.** *Внесок здобувача: участь у розробці феноменологічної гіпотези ефекту індукованого тепломасообміну, встановлення рівняння індукованого тепломасообміну на основі його балансних рівнянь.*

32. Погожих М. І., Пак А. О., Пак А. В., Жеребкін М. В. Аналіз процесу індукованого тепломасообміну методом фазового простору / Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. пр. / Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. Х.: ХДУХТ, 2017. Вип. 2(25). С. 284–293. **Стаття у фаховому виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз.** *Внесок здобувача: проведення теоретичного аналізу ефекту індукованого тепломасообміну методом фазового простору, встановлення принципів відмінностей процесу тепломасообміну в термостаті з енергією активації від тепломасообміну без енергії активації.*

33. Погожих М. І., Пак А. О., Пак А. В., Жеребкін М. В. Технічна реалізація апаратів з використанням процесу індукованого тепломасообміну // Science Rise. 2017. № 6(35). С. 29–33. **Стаття у виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз.** *Внесок здобувача: розробка концептуальних рішень конструкцій апаратів з індукованим тепломасообміном.*

34. Пак А. О., Сабадаш С. М., Павлюк І. Н. Определение дисперсного состава послеспиртовой зерновой барды // Вестник Алматинского технологического университета. Алматы: АТУ, 2015. Вып. 2. С. 43–47. **Стаття у виданні Республіки Казахстан.** *Внесок здобувача: участь у постановці завдання дослідження, написання програм для розрахунку диференціальних та інтегральних функцій розподілення частинок післяспиртової зернової барди за розмірами.*

35. Установка для гидротермичной обработки та сушіння крупи: пат. на корисну модель № 48230, Україна, МПК А 23 L 3/00. // Черевко О. І., Погожих М. І., Жеребкін М. В., Пак А. О., Цуркан М. М.; № u200909646; заявл. 21.09.2009;

опубл. 10.03.2010, Бюл. № 5. 2 с. *Внесок здобувача: участь у постановці задач та розробці концептуального рішення конструкції апарата.*

36. Спосіб дослідження динамічної поведінки вологи в капілярно-пористих колоїдних матеріалах методом ЕПР-спінових міток під час сушіння: пат. на корисну модель № 87562, Україна, МПК G 01 N 24/10. // Погожих М. І., Ромоданов І. С., Пак А. В., Пак А. О.; № u201310871; заявл. 10.09.2013; опубл. 10.02.2014, Бюл. № 3. 4 с. *Внесок здобувача: розробка програмного математичного забезпечення для аналізу спектрів ЕПР.*

37. Погожих М. І., Пак А. О., Толстова Я. В. Дослідження теплової дії на плодово-ягідну сировину під час ЗТП-сушіння зі штучним пороутворенням // Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини: Всеукр. наук.-практ. конф., 31 жовтня 2008 р.: тези доп. Х.: ХДУХТ, 2008. С. 11–12. *Внесок здобувача: розробка експериментальної установки для дослідження теплової дії на плодово-ягідну сировину під час сушіння, написання програм для розрахунку середньооб'ємної температури сировини за кінетикою температури.*

38. Перцевий Ф. В., Пак А. О., Теймурова А. Т. Исследование количества вымороженной влаги в агаровых студнях с использованием пищевой белковой добавки // Стратегічні напрямки розвитку підприємств харчових виробництв, ресторанного господарства і торгівлі: Міжнар. наук.-практ. конф., присвячена 70-річчю з дня народження д-ра техн. наук, проф., чл.-кор. ВАСГНІЛ Беляєва М.І., 19 листопада 2008 р.: тези доп. Х.: ХДУХТ, 2008. С. 147–148. *Внесок здобувача: постановка експериментальних досліджень системної води агарових драглів низькотемпературним калориметричним методом, проведення вимірювань та участь в узагальненні висновків.*

39. Погожих М. І., Пак А. О., Толстова Я. В. Исследование гигроскопических свойств среды для культивирования бактерий методом Фурье-анализа ЭПР-спектров // Техника и технологии пищевых производств: VII-я Междунар. научн.-техн. конф., 21-22 мая 2009 г.: тезисы докл. Могилев: УО МГУП, 2009. С. 303. *Внесок здобувача: розробка алгоритму та написання програм для Фур'є-аналізу ЕПР-спектрів спіноміченої сировини, участь в узагальненні висновків.*

40. Погожих М. І., Пак А. О., Жеребкін М. В. Способ и установка для получения быстровосстанавливаемых каш с использованием принципов СТП-сушки // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов: Междунар. научн.-техн. семинар, 11-13 мая 2010 г.: сб. трудов. Воронеж: ГОУ ВПО «ВГЛТА», 2010. С. 220–223. *Внесок здобувача: участь у розробці способу та розробка концептуального рішення апарата для гідротермічної обробки круп..*

41. Погожих М. І., Пак А. О., Жеребкін М. В. Шляхи підвищення якості швидковідновлювальних продуктів харчування, які отримують з використанням сушіння змішаним теплопідводом // Strategy of Quality in Industry and education: VI International Conference, June 4-11 2010: proceedings. Varna, Bulgaria, 2010. Volume I (P. 1). P. 422–423. *Внесок здобувача: проведення аналізу потенціальних шляхів підвищення якості швидковідновлюваних каш, отримуваних з використанням індукованого тепломасообміну.*

42. Погожих М. І., Пак А. О. Постановка задачи исследования развития диссипативных структур при сушке смешанным теплоподводом // Современные энергосберегающие тепловые технологии (Сушка и термовлажностная обработка материалов): IV Междунар. научн.-практ. конф., 20-23 сентября 2011 г.: сб. трудов. Москва: ФГБОУ ВПО «МГАУ им. В.П. Горячкина», 2011. Т.1. С. 432–436. *Внесок здобувача: участь у обґрунтуванні вирішення теплової задачі для індукованого тепломасообміну для пояснення та описання його особливостей.*

43. Погожих М. І., Пак А. О., Жеребкін М. В. Дослідження кінетики сушіння сировини при виробництві швидковідновлюваних каш // Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини: Всеукр. наук.-практ. конф., 3-4 листопада 2011р.: тези доп. Х.: ХДУХТ, 2011. С. 62-63. *Внесок здобувача: розробка експериментальної установки для дослідження зміни вологовмісту та температури в процесі гідротермічної обробки сировини, участь в узагальненні висновків.*

44. Погожих М. І., Пак А. О., Жеребкін М. В. Визначення умов зберігання швидковідновлювальних каш, отриманих сушінням змішаним тепло підведенням // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі. Економічна стратегія і перспективи розвитку сфери торгівлі та послуг: Міжнар. наук.-практ. конф., 19 травня 2011 р.: тези доп. у 4 ч. Х.: ХДУХТ, 2011. Ч.2. С. 85–86. *Внесок здобувача: участь у проведенні експериментальних досліджень тензометричним методом, виявлення змін гігроскопічних властивостей швидковідновлюваних каш під час зберігання.*

45. Пак А.О. Функція розподілення потужності дисипативних структур в сировині під час ЗТП-сушіння // Наукова періодика слов'янських країн в умовах глобалізації: Міжнар. наук. конф.: матеріали. Київ, 2012. Ч.1. Том. Промислові технології. С. 19–21.

46. Погожих М. І., Пак А. О., Жеребкін М. В. Дослідження стану вологи швидковідновлюваної каші методом ЕПР-спінових міток // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі. Економічна стратегія і перспективи розвитку сфери торгівлі та послуг: Міжнар. наук.-практ. конф. присвячена 45-річчю ХДУХТ, 18 жовтня 2012 р.: тези доп. у 2 ч. Х.: ХДУХТ, 2012. Ч. 1. С. 425–427. *Внесок здобувача: розробка алгоритму та написання програм для аналізу форм зв'язку системної води швидковідновлюваних каш за їх ЕПР-спектрами.*

47. Пак А. О., Павлюк І. Н., Мольський А. С. Установка для исследования испарения влаги из зерновых // Пищевые инновации и биотехнологии: Междунар. научн. форум: тезисы докл. Кемерово: КемГИПП, 2013. С. 772–775. *Внесок здобувача: постановка завдання дослідження, розробка конструкційних особливостей пристрою для дослідження інтенсивності випарювання системної води зернових.*

48. Погожих М. І., Пак А. В., Пак А. О. Дослідження системної води модельних тіл із крохмалю тензометричним методом // Вода в харчових продуктах і для харчових продуктів : Всеукр. наук.-практ. конф., 16-17 травня 2013 р.: тези доп. Х.: ХДУХТ, 2013. С. 59-60. *Внесок здобувача: проведення математичної обробки*

результатів тензометричних досліджень модельних тіл із крохмалю, наведення кореляції отриманих експериментальних даних з даними, отриманими ЕПР-методом.

49. Погожих М. І., Пак А. О., Чеканов М. А. Оцінювання ефективності використання енергії // Прогресивна техніка та технології харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі. Економічна стратегія і перспективи розвитку сфери торгівлі та послуг: Міжнар. наук.-практ. конф. присв. 75-річчю з дня народж. ректору ун-ту (1988-1991 рр.), д-ра техн. наук, проф., чл.-кор. ВАСГНІЛ Беляєва М. І., 19 листопада 2013 р.: тези доп. у 2 ч. Х.: ХДУХТ, 2013. Ч. 1. С. 424–425. *Внесок здобувача: участь у розробці концепції підвищення енергоефективності процесів харчових виробництв та узагальненні висновків.*

50. Погожих М. І., Пак А. О. Розвиток наукових основ ефективного керування технікою та технологією ЗТП-сушіння харчової сировини // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність: Міжнар. наук.-практ. конф., 22 травня 2014 р.: тези доп. у 2-х ч. Х.: ХДУХТ, 2014. Ч. 1. С. 3-4. *Внесок здобувача: участь у постановці завдання дослідження та у проведенні аналізу потенційних можливостей керування енергоефективністю індукованим тепломасообміном під час його застосування для сушіння харчової сировини.*

51. Погожих М. І., Пак А. В., Пак А. О. Потенційні можливості штучного керування процесом сушіння вологої сировини // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність: Міжнар. наук.-практ. конф., 14 травня 2015 р.: тези доп. у 2-х ч. Х.: ХДУХТ, 2015. Ч. 1. С. 300–301. *Внесок здобувача: виявлення чинників для керування енергоефективністю індукованим тепломасообміном під час його застосування для сушіння харчової сировини.*

52. Погожих М. І., Синєкоп М. С., Пак А. О. Використання числових методів для дослідження математичних моделей сушіння // Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини: Всеукр. наук.-практ. конф. до 25-річчя факультету обл. та техн. сервісу ХДУХТ, 29 жовтня 2015 р.: тези доп. Х.: ХДУХТ, 2015. С. 13–14. *Внесок здобувача: побудування розподілення полів температур за різних моментів часу в термостаті циліндричної форми, отриманого за розв'язком задачі про розподіл температури з використанням методу R-функцій, участь в узагальненні висновків.*

53. Погожих М. І., Синєкоп М. С., Пак А. О. Структура розв'язання задач теорії сушіння капілярно-пористих тіл складної форми // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність: Міжнар. наук.-практ. конф., 19 травня 2016 р.: тези доп. у 2-х ч. Х.: ХДУХТ, 2016. Ч. 1. С. 369–370. *Внесок здобувача: побудування розподілення полів температур за різних моментів часу в термостаті паралелепіпедної форми, отриманого за розв'язком задачі про розподіл температури з використанням методу R-функцій, участь в узагальненні висновків.*

54. Погожих М. І., Пак А. О., Жеребкін М. В. Дослідження характеру процесу ІнтМО за наявності розривів ККПТ всередині термостату // Розвиток харчових

виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність: Міжнар. наук.-практ. конф., присв. 50-річчю заснування ХДУХТ, 18 травня 2017 р.: тези доп. у 2-х ч. Х.: ХДУХТ, 2017. Ч. 1. С. 316–317. *Внесок здобувача: постановка завдання дослідження, розробка способів реалізації розривів колоїдного капілярно-пористого тіла в термостаті, участь в узагальненні висновків.*

55. Погожих М. І., Пак А. О., Жеребкін М. В., Рурак Л. В. Фазовий портрет процесу індукованого тепломасообміну // Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини: Всеукр. наук.-практ. конф. присв. 50-річчю ХДУХТ, 1-2 червня 2017 р.: тези доп. Х.: ХДУХТ, 2017. С. 43-44. *Внесок здобувача: проведення теоретичного аналізу ефекту індукованого тепломасообміну методом фазового простору, узагальнення висновків.*

АНОТАЦІЯ

Пак А.О. Розробка наукових основ індукованого тепломасообміну та його використання в процесах та обладнанні харчових виробництв. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв. – Харківський державний університет харчування та торгівлі Міністерства освіти і науки України, Харків, 2017.

Робота присвячена розробці наукових основ індукованого тепломасообміну (ІнТМО) та його використання в процесах та обладнанні харчових виробництв. Наукова концепція роботи полягає у такому: теорія – індукування тепломасообміну в термостаті з обтюратором флуктуаціями параметрів газу в обтюраторі сприятиме ефективному розсіянню енергії на випаровування рідини; техніка – термостат з обтюратором, що містить рідину та/або вологе колоїдне капілярно-пористе тіло, являє собою керований тепломасообмінний апарат для харчової промисловості.

У роботі сформульовано феноменологічну гіпотезу ефекту ІнТМО. Сформульовані необхідні та достатні умови для спостереження і регулювання ефекту ІнТМО. На основі феноменологічних балансних рівнянь отримано рівняння ефекту ІнТМО. Експериментальними дослідженнями доведено основні положення гіпотези ефекту ІнТМО та виявлено можливості його використання для виконання низки теплових операцій харчової промисловості. Теоретичними дослідженнями виявлено особливості механізму та рушійні сили тепломасообміну під час ІнТМО, які дозволяють керувати цим ефектом. Розроблені концептуальні рішення практичної реалізації апаратів із використанням ІнТМО для виконання таких технологічних операцій харчової промисловості: сушіння; гідротермічна обробка; випарювання, згущення; ректифікація, дистиляція; охолодження, термостатування.

Ключові слова: індукований тепломасообмін, системна вода, термостат, обтюратор, сушіння, гідротермічна обробка, випарювання, ректифікація.

АННОТАЦИЯ

Пак А.О. Разработка научных основ индуцированного теплообмена и его использование в процессах и оборудовании пищевых производств. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.18.12 – процессы и оборудование пищевых, микробиологических и фармацевтических производств. – Харьковский государственный университет питания и торговли Министерства образования и науки Украины, Харьков, 2017.

Работа посвящена разработке научных основ индуцированного теплообмена (ИнТМО) и его использования в процессах и оборудовании пищевых производств. Научная концепция работы заключается в следующем: теория – индуцирование теплообмена в термостате с обтюратором флуктуациями параметров газа в обтюраторе способствует эффективному рассеиванию энергии на испарение жидкости; техника – термостат с обтюратором, содержащий жидкость и/или влажное коллоидное капиллярно-пористое тело, представляет собой управляемый теплообменный аппарат для пищевой промышленности.

В работе сформулирована феноменологическая гипотеза эффекта ИнТМО. Сформулированы необходимые и достаточные условия для наблюдения и регулирования эффекта ИнТМО. На основе феноменологических балансных уравнений получено уравнение эффекта ИнТМО. Экспериментальными исследованиями доказаны основные положения гипотезы эффекта ИнТМО и выявлены возможности его использования для выполнения ряда тепловых операций пищевой промышленности. Теоретическими исследованиями выявлены особенности механизма и движущие силы теплообмена при ИнТМО, которые позволяют управлять данным эффектом. Разработаны концептуальные решения практической реализации аппаратов с использованием ИнТМО для выполнения следующих технологических операций пищевой промышленности: сушка; гидротермическая обработка; выпаривание, сгущение; ректификация, дистилляция; охлаждение, термостатирование.

Ключевые слова: индуцированный теплообмен, системная вода, термостат, обтюратор, сушка, гидротермическая обработка, выпаривание, ректификация.

ANNOTATION

Pak A.O. Development of scientific bases of the induced heat and mass transfer and its application in the processes and equipment of food industry. – Manuscript.

Dissertation for the Doctor's degree of technical science by speciality 05.18.12 – Processes and Equipment of Food, Microbiological and Pharmaceutical Industries. – Kharkiv State University of Food Technology and Trade of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2017.

The work is dedicated to the development of scientific background of the induced heat and mass transfer (hereinafter referred to as InHMT) and its applications in processes and equipment of food industry.

Phenomenological hypothesis of InHMT effect is formulated. The necessary and sufficient conditions for observing and regulating the effect of INMO are formulated. The equation of InHMT effect is obtained based on phenomenological balance equations. It is found that mass flow of liquid carried out from the thermostat in a gas state, induces the heat flow dissipated inside the thermostat. Phenomenological hypothesis of InHMT effect was proved experimentally.

Analysis of the process of heat and mass transfer in the thermostat by the method of phase space has proved that "environment - internal environment of the thermostat" system is a flowing dynamic system in relation to thermal energy and mass. In such dynamic system, the processes of self-organization are possible. Efficient dissipation of thermal energy due to phase transitions of the first kind. It is noted, that the area under the negative part of phase trajectory on the phase area is proportional to heat content of the internal environment of the thermostat spent on the phase transition of fluid to its gas state. This area is a criterion of energy efficiency of InHMT.

The concept of "system water" as a liquid phase, which is in the volume of the food system inside the thermostat during the time not less than the characteristic time of the technological operation, which determines the behaviour of heat and mass transfer and functional and technological properties of this food system, is introduced. Investigation of system water demonstrated that addition of pectin, sugar, elamine, starch, animal protein concentrates into food raw materials results in the decrease of the amount of system water participating in InTMO. The researches of dynamic behaviour of model bodies from starch and gluten by EPR-method showed that system water of the investigated bodies has two forms of bond with solid substances. It is established that for starch bodies there are three structures determined by the molar mass of starch. It is noted that the portion of system water that does not participate in InTMO, determines the requirements for storage conditions of food raw materials and products.

The influence of the order parameters (size of the thermostat internal volume; physical properties of the internal environment; the presence of steam-proof barriers, gaps in liquid and solid phases inside the thermostat comparable in size to the dimensions of the thermostat internal volume) and manage parameters (thermostat temperature, external airflow parameters (temperature, velocity, angle of obturator airflow)) on InHMT effect are determined. The ranges of rational values of these parameters are defined.

It is proved that InHMT effect is impossible without external activation work. External work is performed by air flow, which moves along the obturator. Kinetic energy of the air flow must not be less than the value of InHMT activation energy. It is proved that the general necessary condition for InHMT realization is the support of the integrity of gas environment inside the thermostat.

Investigations of the nature of the influence of InHMT at the thermostat temperature higher than the boiling point of the liquid determined the impossibility of achieving boiling temperature during InHMT by this fluid. It was established that if the mixture of liquids with different boiling temperature is used during InHMT, the liquids pass to the gas state in turn.

It is proposed development of R-functions method together with small parameter method and Bubnov–Galerkin projection method for solving the problems of heat and

mass transfer. Approximate solutions of the problem of temperature and moisture distribution in colloid capillary-porous body with boundary conditions of the third and first kind were obtained. It is proved that application of the developed models without the formation and development of dissipative structures does not give satisfactory results. Analytical view of the function of dissipative structures power development in colloid capillary-porous body during InHMT is obtained. This function described the features of the InHMT effect.

Conceptual solution of practical implementation of the devices applying InHMT effect are proposed for such technological operations in food industry: drying; hydrothermal processing; evaporation, condensation; rectification, distillation; cooling, thermostating. The method and apparatus for continuous hydrothermal processing of cereals using InHMT effect are designed. The final product of the developed method is instant porridge. The technological scheme of hydrothermal processing of cereals is developed. The apparatus for hydrothermal processing of cereals with using InHMT effect is calculated based on heat and mass balance equations taking into account InHMT features. It is proved that the development of economic effect is achieved by reducing the number of used technological operations, performing basic operations operation in one device and by reducing energy consumption per unit of a product by more than 1.3 times.

Keywords: induced heat and mass transfer, system water, thermostat, obturator, drying, hydrothermal processing, evaporation, rectification.

Підписано до друку 31.10.2017 р. Формат 60×90/16. Папір офсет. Друк офсет.
Умов. друк. арк. 2,7. Тираж 130 прим. Замовл. №

Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ», ФО-П Миронов М.В.,
м. Харків, вул. Мистецтв, 3 літер Б-1.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ВО 4 № 022953